

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»



ISSN 1684-8519

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 326, № 2, 2015

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Редакционная коллегия

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р тех. наук (Россия)
Кирьянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коробочкин В.В., д-р техн. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Турция)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2015

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета» (Известия ТПУ) – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № 77-16615 от 24 октября 2003 г.

ISSN 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

«Известия Томского политехнического университета» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации георесурсов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия ТПУ»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов
- Прикладные задачи технологий георесурсов.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале «Известия ТПУ» на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com

Ministry of Education and Science of the Russian Federation
National Research Tomsk Polytechnic University



ISSN 1684-8519

BULLETIN

OF THE TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY

Volume 326, № 2, 2015

TPU  PUBLISHING
Tomsk

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Editorial Board

Dyachenko A.N., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korobochkin V.V., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (Turkey)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2015

AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University (TPU Bulletin) is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University. The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 1684-8519) and nationally (Certificate PE № 77-166615, October 24, 2003 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets;
- Applied Aspects of Geo Assets technologies.

TPU Bulletin publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

The Bulletin of the Tomsk Polytechnic University is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Возможные пути улучшения государственного регулирования геологической отрасли в России**
Попов А.Б. 6
Possible ways to improve the state regulation in geological industry in Russia
Popov A.B.
- Геохимические неоднородности палеоэстуарного бассейна Ваньеганской структуры (Западная Сибирь)**
Афонин И.В., Татьяна Г.М., Тишин П.А. 14
Geochemical heterogeneity of paleoestuarine basin of Vaneganskaya structure (Western Siberia)
Afonin I.V., Tatyana G.M., Tishin P.A.
- Геохимическая характеристика ленточных глин Горного Алтая и возможности их использования при гляциологических исследованиях**
Рихванов Л.П., Окишев П.А., Соболева Н.П., Матаев Е.И. 23
Geochemical features of varved clays in Gorny Altai and their potential use in glaciological studies
Rikhvanov L.P., Okishev P.A., Soboleva N.P., Mataev E.I.
- Новые данные по геохимии и петрологии Топольнинского габбро-гранодиорит-гранитного комплекса Горного Алтая**
Гусев А.И., Коробейников А.Ф., Гусев Н.И., Кукоева М.А. 37
New data on geochemistry and petrology of Topolninsky complex in Gorny Altai
Gusev A.I., Korobeynikov A.F., Gusev N.I., Kukoeva M.A.
- Химический состав нефти крапивинского месторождения**
Торломоева А.Э., Чешкова Т.В., Коваленко Е.Ю., Сагаченко Т.А. 48
Chemical composition of petroleum of Krapivinskoe oilfield
Torlomoeva A.E., Cheshkova T.V., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A.
- Удельная теплоемкость фильтрационной среды как характеристика ползучей фильтрации воды**
Трушкин В.В. 56
Specific heat capacity of filter medium as a parameter of water creeping filtration
Trushkin V.V.
- Калнинский ультрамафитовый массив Западного Саяна: рудная минерализация и ее генетическая природа**
Юричев А.Н. 61
The Kalninsky ultramafic massif of Western Sayan: ore mineralization and its genetic nature
Yurichev A.N.
- Распределение вязких и парафинистых нефтей по площади и разрезу отложений юго-востока Западной Сибири**
Красноярова Н.А., Ященко И.Г., Серебренникова О.В. 70
Area and cross-section distribution of viscous waxy oils in deposits located in the southeast of West Siberia
Krasnoyarova N.A., Yashchenko I.G., Serebrennikova O.V.
- Анализ процесса разрушения анизотропной горной породы шарошечными долотами**
Нескоромных В.В. 80
Analysis of anisotropic rock destruction with cone bits
Neskoromnykh V.V.
- Детальная реконструкция функционального состояния болота как отклик на изменения континентального климата голоцена (средняя тайга Западной Сибири)**
Преис Ю.И. 90
Detailed reconstruction of bog functional state as response to continental climate changes in Holocene (the middle taiga of West Siberia)
Preis Y.I.
- Исследование влияния растворов солей на гидратацию глинистых минералов при бурении скважин на примере Талнахского рудного узла**
Неверов А.Л., Рожков В.П., Каратаев Д.Д., Неверов А.А. 103
Study of salt solutions influence on clay minerals hydration when drilling wells on the example of Talnakhskoe deposits
Neverov A.L., Rozhkov V.P., Karataev D.D., Neverov A.A.
- Макромодель тепловых процессов установки для выращивания кристаллов солнечных элементов методом Бриджмена**
Бабушкин Ю.В., Филиппов М.М., Нгуен С.Х., Грибенюков А.И. 117
Mathematical model of multizone thermal installation for crystal growth by Bridgman method
Babushkin Yu.V., Philippov M.M., Nguyen Xuan Hung, Gribenyukov A.I.
- Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах криолитозоны Западной Сибири**
Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., Брыксина Н.А., Покровский О.С., Кирпотин С.Н., Широкова Л.С. 127
Methodical issues of evaluating methane capacity in small thermokarst lakes of Western Siberia permafrost
Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Y., Bryksina N.A., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S.
- Методика построения крупномасштабных карт гидроизогипс на основе модели морфоструктуры рельефа**
Лукин Ан.Ал., Лукин Ал.Ан., Лимарева А.А. 136
Relief morphostructure models method of building large-scale map of hydroisohypses
Lukin An.A., Lukin Al.A., Limereva A.A.
- Влияние отравления бериллиевых блоков на нейтронно-физические характеристики реактора ИВГ.1М**
Прозорова И.В. 148
Influence of poisoning of beryllium blocks on reactivity of the IVG.1M reactor
Prozorova I.V.

УДК 553.04; 338.24

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В РОССИИ

Попов Андрей Борисович,

доцент каф. геологии и природопользования
ФГБОУ ВПО «Амурский государственный университет», Россия, 675027,
г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21. E-mail: master@amursu.ru

Актуальность работы. В настоящее время в России увеличиваются темпы добычи полезных ископаемых, при этом геологическая отрасль уже не в состоянии обеспечить необходимый прирост запасов для добывающих предприятий, что вызвано не только постепенным истощением минерально-сырьевой базы страны и другими объективными причинами, но и самой организацией работ в отрасли. На протяжении ряда лет развитию геологической отрасли мешает множество преград, связанных с несовершенством нормативно-правовой базы и, как следствие, неэффективностью государственного управления.

Цель исследования: выявить основные проблемы государственного регулирования геологической отрасли и определить возможные пути их решения, показать, как изменение отдельных положений нормативно-правовой базы недропользования может снизить стоимость геологоразведочных работ, сократить сроки оформления разрешительной документации и, как следствие, сроки ведения самих геологоразведочных работ.

Методы исследования: анализ ряда особенностей государственного регулирования геологической отрасли и положений законодательной базы геологического изучения недр Российской Федерации; определение практической значимости и целесообразности отдельных нормативных актов; сравнение организации геологоразведочных работ в России и за рубежом.

Результаты. Выявлены наиболее важные проблемы, которые могут быть решены путем внесения изменений в действующее законодательство. Дано экономическое обоснование несоответствия отдельных положений нормативно-правовых актов принципам современной рыночной экономики и показано, как эти проблемы решаются в развитых зарубежных странах. Разработаны предложения по совершенствованию государственного регулирования геологической отрасли.

Выводы. Предложения по решению выявленных проблем имеют как правовые, так и экономические составляющие, и внедрение предлагаемых рекомендаций позволит за счет изменений законодательной базы улучшить состояние геологической отрасли России. Решение выявленных проблем не потребует финансовых вложений и позволит сократить как сроки проведения геологоразведочных работ, так и безосновательные расходы геологических предприятий.

Ключевые слова:

Геология, инвестиции, недропользование, зарубежные страны, регулирование, государственное управление.

Введение

Основными задачами геологии являются поиски, оценка и разведка месторождений полезных ископаемых. К сожалению, существующая законодательная база не позволяет успешно выполнять эти задачи.

Цель данной работы показать, как изменение отдельных положений нормативно-правовой базы недропользования может снизить стоимость геологоразведочных работ и сократить сроки оформления разрешительной документации. Решение этих вопросов наиболее актуально в настоящее время, когда вопреки общераспространенному мнению, при наличии огромных прогнозных ресурсов, в России практически не осталось нераспределенных разведанных месторождений. Имеющиеся запасы полезных ископаемых способны обеспечить существование горнодобывающей промышленности в среднем на три – двадцать лет, в зависимости от конкретного полезного ископаемого. При этом ежегодно сокращается срок обеспеченности предприятий запасами. Предприятия сосредотачиваются на добыче полезных ископаемых, но не уделяют должного внимания геологоразведочным работам и, как следствие, воспроизводству собственной минерально-сырьевой базы.

С каждым годом уменьшается доля крупных месторождений полезных ископаемых, остаются объекты либо небольшие по объемам запасов, либо

с низкими содержаниями полезного компонента. Эти участки недр являются непривлекательными для инвесторов, так как разработка подобных месторождений находится на грани экономической эффективности, где одним из негативных факторов является обязательное удорожание, связанное с повышенной долей расходов, в том числе на геологоразведку и оформление разрешительной документации [1].

Стоимость геологоразведочных работ зависит от расположения месторождения, свойств горных пород, глубины залегания полезного ископаемого, сложности геологических условий, вида полезного ископаемого, его количества и содержания в горной породе и других факторов, составляя от первых миллионов до сотен миллионов, а на определенных видах месторождений – до миллиардов рублей. На стоимость геологических работ сильно влияет оформление различной разрешительной и отчетной документации. Средства, затрачиваемые на оформление этих документов, иногда могут превышать стоимость непосредственных геологоразведочных работ, что особенно проявляется при изучении небольших месторождений, например мелких месторождений общераспространенных полезных ископаемых.

Главная проблема в недропользовании – отставание разведки от добычи. Ежегодно погашение запасов полезных ископаемых значительно превы-

шает их прирост. Одной из причин длительности сроков геологоразведочных работ является большой бюрократический оборот документов и значительное время, отведенное на рассмотрение представляемой документации. Кроме обязательной текущей отчетности по результатам изучения участков недр, существующее законодательство заставляет недропользователей нести значительные расходы еще до начала проведения работ. Это финансовые затраты на получение лицензии, составление и утверждение проектно-сметной и технической документации. Суммы этих расходов, значительно завышены, а на подготовку, оформление и согласования необходимых материалов требуется значительное время. На увеличение сроков работ влияют обязательные остановки геологоразведочных работ после проведения определенных этапов, связанные с необходимостью оформления документации, разрешающей дальнейшее проведение геологического изучения.

Государственное регулирование недропользования должно отвечать требованиям современных рыночных отношений государства и недропользователя, а правовые нормы должны быть жизнеспособными и эффективными.

На протяжении ряда лет развитию геологической отрасли мешает множество преград, связанных с несовершенством нормативно-правовой базы и, как следствие, неэффективностью государственного управления. Выявление существующих проблем и поиск путей их решения позволят оптимизировать государственное регулирование отрасли, что окажет позитивное влияние не только на решение задач, стоящих перед геологией, но и на экономику России в целом.

Отсутствие возможности продажи права на пользование недрами у недропользователей, открывших месторождение по лицензии на право геологического изучения за счет собственных средств

Отсутствие в российском законодательстве правовой нормы о возможности переуступки (на возмездной основе) первооткрывателем месторождения своего права на пользование недрами другому пользователю недр является главным препятствием для существования геологоразведочных организаций, специализирующихся на поисках месторождений полезных ископаемых и их оценке [2]. Количество таких предприятий значительно сократилось. Геологоразведочные предприятия, в лучшем случае, превратились в организации, проводящие геологоразведочные работы для предприятий, имеющих лицензии на право поисков, разведки и добычи полезных ископаемых, а в худшем случае перепрофилировались и, в настоящее время, занимаются иной деятельностью, не связанной с геологоразведкой.

Участки недр, изученные за счет собственных средств предприятий, не могут быть проданы организациям, добывающим полезные ископаемые.

В связи с отсутствием правового регулирования геологоразведочные предприятия, открывшие и оценившие месторождения, не имеют законной возможности получения дохода за свой труд.

Согласно Закону РФ «О недрах» участки недр не могут быть предметом купли и продажи или отчуждаться в иной форме, хотя этим же законом установлено, что права пользования недрами могут отчуждаться или переходить от одного лица к другому в той мере, в какой их оборот допускается федеральными законами.

В настоящее время покупка и продажа прав на лицензированные участки недр, в том числе не только право на геологическое изучение, но и на разведку и добычу, осуществляется под предлогом переоформления лицензии, где продаются не участки недр, а сами предприятия, имеющие лицензии на эти участки. Основаниями для такой продажи – переоформления – являются: прекращение деятельности юридического лица вследствие его присоединения к другому юридическому лицу; реорганизация юридического лица путем его разделения или выделения из него другого юридического лица; если юридическое лицо выступает учредителем нового юридического лица, созданного для продолжения деятельности на предоставленном участке недр; передача права пользования участком недр дочернему обществу. Все эти механизмы, юридически по передаче прав пользования недрами, а фактически по продаже участков недр, широко используются в настоящее время. Существуют предприятия, которые специализируются на том, что покупают участки недр на аукционах или выигрывают их на конкурсах, а затем по завышенным ценам продают их тем предприятиям, которые непосредственно заинтересованы в разработке месторождений.

Таким образом, рынок продажи лицензий, то есть рынок продажи участков недр, уже давно существует. Механизм продажи участков недр сильно бюрократизирован, и в нем есть ряд положений, которые содержат субъективную оценку документов, предоставляемых в этом случае органам власти, а значит, и пути для развития коррупции.

Во всех развитых странах продажа лицензий (участков недр) не запрещается законодательством [3]. Недропользователям, открывшим и изучившим месторождения, не нужно для продажи своих участков искать лазейки в законах, в связи с чем сокращается влияние чиновничьего аппарата на этот рыночный механизм. Поэтому в зарубежных странах основное количество геологоразведочных предприятий занимаются непосредственно поиском и разведкой новых месторождений.

Таким образом, необходимо создание в российском законодательстве правовой нормы о возможности переуступки (на возмездной основе) первооткрывателем месторождения своего права на пользование недрами другому пользователю недр. Содержание и применение этой правовой нормы должно быть максимально простым и понятным.

Недостатки Порядка получения лицензий для целей геологического изучения участков недр за счёт собственных средств недропользователей

До 2005 г. действовал заявочный принцип предоставления лицензий на право пользования недрами для геологического изучения, включающего поиски и оценку месторождений полезных ископаемых. Это стимулировало привлечение в геологоразведку частных инвестиций и обеспечивало возможность получения лицензий для предприятий, ведущих не только полевые работы, но и занимающихся изучением геологической, в том числе и архивной информацией, привлекающих кадры и разработки различных научных учреждений [4].

Приказом МПР РФ от 15.03.2005 № 61 «Об утверждении порядка рассмотрения заявок на получение права пользования недрами для целей геологического изучения участков недр» были введены новые правила предоставления лицензий. Основным недостатком нового Порядка является то, что на получение лицензии на заявленный участок могут подавать документы другие претенденты. В этом случае данный участок недр выставляется на аукцион для получения права пользования недрами по совмещённой (геологическое изучение, разведка и добыча) лицензии. При этом предприятие несет расходы, связанные с участием в аукционе. Если на этот аукцион поступает только одна заявка, то аукцион признается несостоявшимся, а единственного участнику аукциона необходимо снова подавать заявку на получение права пользования таким участком недр в целях его геологического изучения за счет собственных средств.

Состав документов, прилагаемых к заявке, весьма громоздкий и содержит значительное количество необоснованных требований к предприятию-заявителю.

Существующая система лицензирования также нарушает права на интеллектуальную собственность недропользователей, подавших заявку. Не имея гарантии на получение лицензии, предприятия не рискуют вкладывать значительные средства и отвлекать свои кадры на аналитическую работу для выявления перспективных участков.

В зарубежных странах система получения лицензии имеет заявительный характер. Существует разрешительная система, когда предоставление права пользования участками недр осуществляется на основании лицензий, патентов, проспекторских разрешений и других документов, и договорная система, когда недра предоставляются путем заключения договоров между государством и недропользователем [5, 6]. При всем разнообразии способов предоставления участков недр в пользование механизм получения участков недр максимально упрощен. Недропользователь выбирает участок для проведения геологоразведочных работ, оформляет заявку и в соответствующем ведомстве закрепляет за собой участок. При этом количество документов на получение участка недр минимально.

Ограничениями, усложняющими порядок предоставления участков недр в зарубежных странах либо запрет на их предоставление, могут являться размеры месторождения, наличие в месторождениях определенных полезных ископаемых, требования к земельным отношениям (наличие чужой собственности на земельный участок, который находится на испрашиваемой площади) и особый характер земель, на которых запрещается разработка полезных ископаемых [7].

По отдельным участкам недр имеется упрощенный порядок предоставления лицензий. Так, в Австралии получить лицензию на добычу золота (без применения горной техники) можно в течение 10 минут по интернету [8].

Необходимо и в России создать систему свободного получения лицензий на геологическое изучение на основании заявок частных инвесторов. Процедура рассмотрения этих заявок должна быть максимально простой и строго регламентированной, а плата за выдачу лицензий – чисто символической [9].

Отсутствие гарантированного права получения лицензии на разведку и добычу у недропользователей, открывших месторождение, в результате проведения геологоразведочных работ за счёт собственных средств

Право пользования участком недр с целью разведки и добычи для недропользователя, за счет средств которого открыто и оценено месторождение полезного ископаемого, было введено в Закон «О недрах» в 1995 г., но до сих пор трудно реализуемо ввиду сложности процедуры оформления такого права, а также неограниченных возможностей чиновника найти причины для отказа его предоставления [2]. Механизм предоставления лицензии на право разведки и добычи месторождения, открытого по лицензии на геологическое изучение за счет собственных средств недропользователя, – это очень долгая процедура, которая не гарантирует конечного результата.

К заявке должен прилагаться пакет, состоящий из 23 видов различных документов, оценка многих из них носит весьма субъективный характер. При этом заявка должна быть подана с соблюдением определенных сроков и содержать материалы, утвержденные и согласованные различными ведомствами, в том числе Министерством природных ресурсов, Федеральным агентством по недропользованию, Министерством экономического развития и торговли РФ, налоговыми органами.

Имеется ряд оснований, по которым заявка на получение лицензии может быть отклонена. Одним из необоснованных требований является необходимость предоставления доказательств того, что недропользователь, открывший месторождение, обладает необходимыми квалифицированными специалистами и опытом работы, финансовыми и техническими средствами для эффективного и безопасного проведения дальнейших работ

на месторождении. При этом не учитывается, что открытие месторождения – это уже факт наличия этих возможностей, а каждое месторождение является возможностью для привлечения инвестиций, за счет которых будут приняты на работу необходимые специалисты, закуплены дополнительная техника и оборудование.

Установление факта открытия месторождения полезных ископаемых осуществляется Федеральным агентством по недропользованию или его территориальным органом на основании заявки недропользователя только в отношении тех видов полезных ископаемых, на геологическое изучение которых ему была выдана лицензия [10, 11]. Открытие на месторождении любого другого полезного ископаемого не будет являться основанием для получения лицензии на разведку и добычу выявленного полезного ископаемого.

То есть в законодательной базе отсутствует безусловное право компании-первооткрывателя месторождения на получение лицензии на право разведки и разработки открытого месторождения.

Для исключения подобных ситуаций необходимо законодательно ввести положение, устанавливающее возникновение права пользования участком недр для разведки и добычи по факту самого открытия, и обязательность оформления такого права в течение не более 6 мес., а также ответственность чиновников за невыполнение этих установлений и тем самым нанесение своими действиями или бездействием значительного материального ущерба недропользователю и государству [12].

Проблемы, связанные с необходимостью обязательного проведения государственной экспертизы проектно-сметной документации

Государственная экспертиза проектно-сметной документации вошла в современное законодательство во времена социалистической системы России, когда существовало государственное регулирование геологической отрасли. Сметы на ведение геологоразведочных работ рассчитываются по СНО-Рам и ССНам, разработанным еще в 1992–1993 гг. Для перевода показателей 1992–1993 гг. в нынешние цены требуются дополнительные расчеты, носящие довольно субъективный характер. При этом не учитывается, что цены на все товары и услуги рыночные и договорные, что никак не отражается в утверждаемых сметах. Тем более непонятна необходимость данной экспертизы для проведения геологоразведочных работ за счет средств недропользователей. Есть различные критерии, по которым и без составления проектно-сметной документации можно определить, что месторождение будет рентабельным. Например, исходя из опыта эксплуатации россыпных месторождений в Амурской области, рентабельными будут объекты с содержанием золота на массу более 150 мг/м³, при мощности продуктивного пласта более 0,5 м, со средней мощностью вскрышных пород. Подобные

критерии есть и для других регионов, и для различных полезных ископаемых.

Проектно-сметная документация при рассмотрении методической части проектов обязательно должна учитывать стадийность проведения работ. Не допускается совмещения оценочной и разведочной стадий изучения участков недр, что также является препятствием для непрерывного геологического изучения.

Государственная экспертиза проектно-сметной документации, являясь бюрократическим барьером для предприятий, не несет никакой правовой ответственности перед акционерами недропользователя за конечный результат [13]. Даже за малый проект недропользователь должен выложить не менее 100 тыс. р., а за крупный – уже более 500 тыс. р., хотя по трудозатратам на проведение этой экспертизы размер платежей можно снизить в 5–10 раз [9]. Срок проведения экспертизы до 36 дней, что также увеличивает сроки начала проведения геологоразведочных работ.

Таким образом, необходимо законодательно ликвидировать эту затратную и ненужную процедуру, тем более что в других станах геологоразведочные организации работают без государственной экспертизы проектно-сметной документации [6].

Проблемы, связанные с необходимостью соблюдения стадийности геологоразведочных работ

Согласно «Положению о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые)», утвержденного распоряжением МПР РФ от 05.07.1999 № 83-р «Об утверждении Положения о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые)» геологоразведочные работы должны проводиться по стадиям. Поиск и оценочная стадия могут совмещаться. При этом геологоразведочные работы могут выполняться непрерывно, в один этап, с одновременным прохождением как поисковых, так и оценочных выработок.

Основной проблемой является разделение геологоразведочных работ на поисково-оценочную и разведочную стадии. После каждой поисково-оценочной стадии необходимо составить отчет о проведенных работах, где необходимо дать обоснование целесообразности и очередности дальнейших работ и подготовить проект геологоразведочных работ на разведочную стадию. Во время подготовки и защиты отчета и проекта не допускается проведение полевых работ по разведочной стадии. Общая стоимость дополнительных отчетов и проектов составляет, в зависимости от месторождения, от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов рублей. Время на подготовку и защиту самих проектов составляет от нескольких месяцев до года.

Целесообразность такого искусственного разделения работ вызывает большие сомнения, особенно при проведении геологоразведки за счет собственных средств недропользователя. Данные, по-

лучаемые в результате геологоразведочных работ для большого количества месторождений, в том числе россыпного золота, общераспространенных полезных ископаемых, угля и других полезных ископаемых, весьма оперативны и позволяют судить о перспективах дальнейшего геологического изучения объекта уже в полевых условиях. Совмещение стадий зачастую просто необходимо, когда дополнительное бурение нескольких линий скважин или проходка нескольких траншей позволяют дать окончательное представление о целесообразности дальнейшего ведения работ.

Проблемы, связанные с обязательностью разработки Временных и Постоянных разведочные кондиций

Разработка кондиций является одной из составных частей отчета по проведенным геологоразведочным работам. Согласно действующему законодательству, по результатам завершения каждой стадии геологоразведочных работ необходимо разработать временные или постоянные кондиции, которые призваны оценить промышленную значимость выявленного месторождения.

Согласно Приказу МПР РФ от 21.07.1997 № 128, технико-экономические обоснования разведочных кондиций должны обеспечивать объективную оценку всех его геологических, горно-геологических, технологических и прочих особенностей и содержать в себе геологическое, горнотехническое, технологическое, экологическое и экономическое обоснования, разрабатываемые на необходимом уровне достоверности, обеспечивающие условия для оценки экономической значимости объекта, то есть необходимые для определения потребительских свойств (ценности) месторождения.

Временные разведочные кондиции разрабатываются для оценки качества и количества полезных ископаемых, экономической значимости и обоснования целесообразности дальнейшей разведки выявленного месторождения. Постоянные разведочные кондиции рассчитываются для определения целесообразности и экономической эффективности его эксплуатации.

Основной задачей разработки кондиций является определение минимального содержания полезного ископаемого и других горнотехнических параметров, при которых освоение данного месторождения будет рентабельной. На основании кондиций утверждаются разведанные запасы, составляются и согласовываются технические проекты освоения месторождений, осуществляется добыча полезного ископаемого. То есть предприятие не имеет права пользоваться участком недр без утвержденных кондиций.

Разработка каждой кондиции требует значительных денежных затрат и 1–1,5 года напряженной работы и большого коллектива грамотных геологов [13]. На время расчета и составления кондиций полностью прекращается непрерывный геологоразведочный процесс. Вывозятся полевые пар-

тии, ликвидируются или консервируются участки, останавливается работа техники, отвлекается значительное число квалифицированных сотрудников.

Кондиции несут в себе большую долю погрешности. Современные методы разведки не позволяют гарантировать точных горнотехнических параметров месторождения. Иногда полная картина геологического строения объекта становится ясной только после его окончательной отработки. Ряд параметров разведочных кондиций носит условный характер. Например, выбор оптимального способа отработки (открытый, подземный, комбинированный, геотехнологический) и системы разработки месторождения; предполагаемая схема обогащения минерального сырья; номенклатура товарной продукции и схема её реализации на рынке. Все эти параметры, при необходимости, будут рассчитываться предприятием, которое будет разрабатывать месторождение, исходя из имеющихся у него технических средств и оборудования.

Условным является и расчет оценки характера воздействия разработки месторождения на окружающую среду и необходимости реализации мероприятий по предотвращению её загрязнения, которые также зависят от выбираемого добывающим предприятием способа отработки месторождения.

В советское время существование кондиций оправдывалась необходимостью избежать ненужного вложения средств государства в освоение нерентабельных месторождений, и обосновывалось стабильностью цен, в том числе на технику и ГСМ. В настоящее время необходимость разработки кондиций является излишней по двум причинам:

1. Разработка месторождений ведется за счет средств недропользователей, и только они могут решать при каких условиях освоение месторождения будет рентабельно. Поэтому, только недропользователи должны определять, какие параметры им важны и в какой степени нужна экономическая проработка этих параметров.
2. В рыночных условиях цены и другие экономические показатели, определяющие величину кондиций, меняются, порой очень существенно, в течение короткого промежутка времени. Поэтому при непостоянной нестабильной рыночной экономике определение постоянных кондиций не имеет смысла. Величины кондиций устаревают уже за время их разработки и утверждения, и их применение нецелесообразно уже на начальной стадии промышленного освоения месторождения. Для того чтобы учесть новые рыночные цены, недропользователь должен разработать и утвердить новые «постоянные» кондиции, пересчитать и утвердить по ним имеющиеся запасы, разработать и согласовать дополнение к техническому проекту, изменить горный отвод. На это опять потребуются 1,5–2 года. К этому времени, из-за новых изменений рыночных цен, отпадает необходимость и в этих, уже устаревших кондициях.

В связи с этим необходимо законодательно отменить обязательную разработку кондиций, в первую очередь для предприятий, проводящих геологоразведочные работы за счет собственных средств. Принятие решения о составлении кондиций должно носить добровольный характер.

Проблемы, связанные с ограничениями участка, предоставляемого лицензией по площади и глубине

Получаемая недропользователем лицензия содержит ограничения как по площади, так и по глубине. Поэтому недропользователь не имеет права проводить работы как за пределами площади лицензии, так и на глубину, большую, чем указанная в лицензии.

Лицензия на право поисков и оценки месторождений полезных ископаемых выдается на участки недр с очень слабой геологической изученностью на относительно условный участок работ. В процессе геологоразведочных работ контуры рудного тела часто оказываются больше площади лицензии, мощность рудных тел также часто оказывается больше предполагаемой мощности. В результате предприятия обязаны останавливать бурение скважин, даже если те не вышли из продуктивных горизонтов.

В данных случаях имеется следующие возможности продолжения изучения месторождения:

- 1) получение новой лицензии на проведение поисково-оценочных работ;
- 2) внесение изменений в уже действующую лицензию;
- 3) расширение горного отвода (для лицензий на право разведки и разработки полезных ископаемых).

Получение новой лицензии занимает от одного года до нескольких лет. При этом нет гарантии, что новый участок недр достанется недропользователю, открывшему месторождение, так как при наличии двух или более претендентов на новый участок месторождение выставляется на аукцион.

Законом о недрах, в целях обеспечения полноты геологического изучения, рационального использования и охраны недр, предусмотрено изменение границ участка недр, предоставленного в пользование. Порядок установления и изменения границ участков недр, предоставленных в пользование, установлен Постановлением Правительства Российской Федерации от 3 мая 2012 г. № 429.

Согласно этому Порядку, изменение границ участка недр может осуществляться только 1 раз в течение срока действия лицензии на пользование недрами, в целях геологического изучения и (или) разведки и добычи того вида полезных ископаемых, который указан в лицензии на пользование недрами, при наличии на части месторождения, расположенной за границами участка недр, менее 20 процентов запасов полезных ископаемых данного месторождения.

Такие ограничения не только не позволяют предприятиям вести геологоразведочные работы

оперативно и непрерывно, но и противоречат Закону РФ «О недрах», требующего обеспечения полноты геологического изучения, рационального комплексного использования и охраны недр.

Сама процедура внесения в лицензию подобных изменений может занимать несколько месяцев и связана с обилием документов, подаваемых в лицензирующие органы.

Для решения этой проблемы необходимо снятие ограничения участков недр по глубине [12], упрощение порядка расширения границ геологического и горного отводов в случае, если в ходе доразведки, проектирования и последующей разработки месторождений, входящих в состав участка комплексного состава, выявляются участки, объемы запасов которых выходят за установленные лицензией границы, при отсутствии лицензий на пользование сопредельными участками недр [14].

Недостатки нормативно-правовых актов, запрещающих индивидуальным предпринимателям проводить геологоразведочные работы на драгоценные камни и драгоценные металлы

Согласно Закону «О драгоценных металлах и драгоценных камнях», индивидуальные предприниматели, занимающиеся геологоразведочными работами, не имеют права в процессе своей деятельности извлекать (добывать) драгоценные металлы и драгоценные камни. Подобного ограничения, как при добычных, так и при геологоразведочных работах, не имеется в законодательстве зарубежных стран [15–17], где драгоценные камни и драгоценные металлы являются такими же полезными ископаемыми, как уголь, железная руда и т. д. Законодательством Российской Федерации преувеличено стратегическое значение драгоценных металлов и драгоценных камней, так как основными полезными ископаемыми, влияющими на экономику страны, уже давно являются нефть и газ. В результате этого ограничения из числа субъектов, ведущих геологическое изучение, выпадает довольно большое количество индивидуальных предпринимателей, которые имеют право использовать наёмный труд и, как представители мелкого бизнеса, могут занять довольно большую нишу, что наблюдается в экономике зарубежных стран.

Проблема запрета добычи индивидуальными предпринимателями драгоценных металлов и драгоценных камней неоднократно поднималась в России на различных уровнях [8, 18], было подготовлено несколько законопроектов по решению этой проблемы, но ни один из них не был принят и ни один из них не содержал правовых норм, касающихся индивидуальных предпринимателей, занимающихся геологоразведочными работами.

Данная проблема не может быть решена одним законопроектом, необходима разработка целого ряда нормативных актов, разрешающих индивидуальным предпринимателям работы, связанные с драгоценными металлами и драгоценными камнями, и устанавливающих правовые нормы как для

добычи, так и для геологического изучения месторождений этих полезных ископаемых.

Заключение

Для успешного развития геологической отрасли необходимо срочное совершенствование существующего законодательства о недрах, что позволит снять многие стоящие перед отраслью преграды. Изменение действующего законодательства должно быть направлено на значительное сокращение сроков геологического изучения месторождений за счет уменьшения количества разрешительной документации и затрат недропользователей на освоение месторождений.

Давно созревшие проблемы могут быть решены только на федеральном уровне [19]. Для выполнения поставленных задач необходимо пройти все

этапы законотворческой деятельности: подготовка проектов нормативных актов, обсуждение, доработка и согласование проектов, принятие законопроектов к рассмотрению в законотворческом органе, утверждение законопроектов, опубликование законов [20]. Инициаторами принятия новых нормативных актов могут быть исполнительные и законодательные органы субъектов Российской Федерации, комитеты и отдельные депутаты Государственной Думы и Совета Федерации.

Принятые меры будут способствовать не только решению проблем геологической отрасли в целом, но и помогут привлечь дополнительные инвестиции, а также включить в процесс освоения месторождений предприятия среднего и малого бизнеса, играющие основную роль в геологическом изучении недр в зарубежных странах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелехин Е.С., Дудиков М.В. Государственное регулирование рационального недропользования // Маркшейдерия и недропользование. – 2011. – № 1. – С. 19–23.
2. Орлов В.П., Сергеев Ю.С., Хакимов Б.В. Закону Российской Федерации «О недрах» – 15 лет // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2007. – № 6. – С. 3–7.
3. Fink R.J. The Natural Resources Law Manual. – Section of Natural Resources, Energy, and Environmental Law, American Bar Association, 1995. 497 p.
4. Кравцов В.А. Геологию необходимо открыть для инвестиций // Золотодобыча. – 2012. – № 3. – С. 9–11.
5. Василевская Д.В. Административно-правовой режим недропользования в Российской Федерации: проблемы теории и практики: автореф. дис. д-ра юрид. наук. – М., 2008. – 52 с.
6. Tank R.W. Legal Aspects of Geology. – New York: Plenum Press, 1983. – 583 p.
7. Волков А.М. Административно-правовое регулирование недропользования в Российской Федерации: автореф. дис..... канд. юрид. наук. – М., 2009. – 192 с.
8. Ошибки законопроекта № 429535–5 // Золотодобыча. – 2012. – № 10. – С. 50–51.
9. Иванов В.Н. О повышении эффективности поисков и разведки месторождений золота // Золотодобыча. – 2012. – № 3. – С. 5–7.
10. Манин Я.В. Административно-правовое регулирование пользования участками недр федерального значения в пределах территории Российской Федерации // Административное и муниципальное право. – 2012. – № 2 – С. 59–70.
11. Полянская И.Г. Особенности государственно-частного партнерства в недропользовании // Бизнес, Менеджмент и Право. Государственно-частное партнерство. – 2009. – № 1. – С. 233–240.
12. Орлов В.П., Хакимов Б.В., Сергеев Ю.С. О рыночном механизме в геологическом изучении недр // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2005. – № 1. – С. 46–50.
13. Власов Н.Г. О геологических проблемах в недропользовании // Золотодобыча. – 2012. – № 5. – С. 6–9.
14. Полянская И.Г., Пахомов В.П., Фадеичев А.Ф. Некоторые аспекты совершенствования лицензионного доступа к недрам // Экономика региона. – 2008. – № 6. – С. 233–240.
15. Barton B.J. Canadian mining law. – Canada, Calgary: Canadian Institute of Resources Law, 1993. – 153 p.
16. U.S. Code/ T.30 Mineral Lands and Minig.- W-n: Gov.print.off., 2002. 968 p.
17. Forbes J.R.S., Lang A.G. Australian Mining and Petroleum Laws. – Sydney: Butterworths, 1987. – 375 p.
18. Орлов В.П., Сергеев Ю.С., Хакимов Б.В. Законодательное обеспечение индивидуальной старательской добычи // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2009. – № 3. – С. 87–89.
19. Попов А.Б. Наиболее важные вопросы в горнодобывающем комплексе Амурской области // Федеральный информационно-аналитический альманах «Россия: власть, экономика, общество». – М.: ИД «Регион-пресс Книга», 2009. – С. 68–69.
20. Стефановская Н.А., Кривошапова Е.В. Законотворчество как форма документоведческой деятельности // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 6. – С. 149–152.

Поступила 25.03.2013 г.

UDC 553.04; 338.24

POSSIBLE WAYS TO IMPROVE THE STATE REGULATION IN GEOLOGICAL INDUSTRY IN RUSSIA

Andrey B. Popov,

Amur State University, 21, Ignatyevskoye Shosse,
Blagoveshchensk, 675027, Russia. E-mail: master@amursu.ru

The relevance of the research. At the moment mining industry production in Russia increases. But geological sector is no longer able to provide necessary increase in reserves for the extractive industries, which is caused not only by the gradual depletion of mineral resource base of the country and other objective reasons, but by work organization in the industry as well. Over the years the development of the geological sector was hindered by a number of barriers related to the imperfection of the legal framework and, as a consequence, to the administration inefficiency.

The main aim of the study is to identify the main problems of state regulation in geological industry and possible solutions; to show how the change in certain provisions of the regulatory framework for the natural reserves use can reduce the cost of exploration work, delays in obtaining permits and, as a consequence, the temporal duration of geological exploration itself.

The methods of study: the analysis of some features of state regulation in geological industry as well as the study of certain legislative framework provisions for geological exploration in Russian Federation. The paper provides as well the assessment of practical relevance and feasibility of individual regulations and comparison between organization of geological exploration in Russia and in foreign countries.

Results: The author has found out the most important issues that can be solved by introducing amendments to the existing legislation and has given the economic substantiation of inconsistency of certain legal provisions to the principles of modern market economy. The paper demonstrates the way these problems are solved in other developed countries. The author developed the proposals for improving the state regulation of geological exploration.

Conclusions. The proposals for solving the identified problems have both legal and economic components. Implementation of the proposed recommendations would improve the state of geological industry in Russia due to changes in the legal framework. The solution of the problems identified would not require additional financial investments and would also reduce the temporal duration of geological exploration and cut unnecessary expenses of geological enterprises.

Key words:

Geology, investments, subsurface management, foreign countries, regulation, public administration.

REFERENCES

- Melekhin E.S., Dudikov M.V. Gosudarstvennoe regulirovanie ratsionalnogo nedropolzovaniya [State regulation of rational resource use]. *Markshedyeriya i nedropolzovanie*, 2011, no. 1, pp. 19–23.
- Orlov V.P., Sergeev U.S., Khakimov B.V. Zakonu Rossiyskoy Federatsii «O nedrah» – 15 let [The 15th anniversary of the law «On subsoil» of the Russian Federation]. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2007, no. 6, pp. 3–7.
- Fink R.J. *The Natural Resources Law Manual*. Section of Natural Resources, Energy, and Environmental Law, American Bar Association, 1995. 497 p.
- Kravtsov V.A. Geologiyu neobkhodimo otkryt dlya investitsy [Geology must be open for investments]. *Zolotodobycha*, 2012, no. 3, pp. 9–11.
- Vasilevskaya D.V. *Administrativno-pravovoy rezhim nedropolzovaniya v Rossiyskoy Federatsii: problemy teorii i praktiki. Dis. Dokt. nauk* [Administrative-legal regime of subsoil use in the Russian Federation: problems of theory and practice. Dr. Diss.]. Moscow, 2008. 52 p.
- Tank R.W. *Legal Aspects of Geology*. New York, Plenum Press, 1983. 583 p.
- Volkov A.M. *Administrativno-pravovoe regulirovanie nedropolzovaniya v Rossiyskoy Federatsii. Dis. Kand. nauk* [Administrative-legal regulation of subsoil use in the Russian Federation. Cand. Diss.]. Moscow, 2009. – 192 p.
- Oshibki zakonoproekta № 429535–5 [Errors of the bill № 429535–5]. *Zolotodobycha*, 2012, no. 10, pp. 50–51.
- Ivanov V.N. O povyshenii effektivnosti poiskov i razvedki mestorozhdeniy zolota [Improving efficiency in search and exploration of gold deposits]. *Zolotodobycha*, 2012, no. 3, pp. 5–7.
- Manin Ya.V. Administrativno-pravovoe regulirovanie polzovaniya uchastkami nedr federalnogo znacheniya v predelakh territorii Rossiyskoy Federatsii [Administrative-legal regulation of using subsoil plots of Federal significance within the territory of the Russian Federation]. *Administrativnoe i municipalnoe pravo*, 2012, no. 2, pp. 59–70.
- Polyanskaya I.G. Osobennosti gosudarstvenno-chastnogo partnerstva v nedropolzovanii [Features of state-private partnership in subsurface use]. *Biznes, Menedzhment i Pravo. Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo*, 2009, no. 1, pp. 233–240.
- Orlov V.P., Khakimov B.V., Sergeev Yu.S. O rynochnom mekhanizme v geologicheskoy izucheni nedr [On market mechanism in geological studying of subsoil]. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2005, no. 1, pp. 46–50.
- Vlasov N.G. O geologicheskikh problemakh v nedropolzovanii [On geological problems in subsoil use]. *Zolotodobycha*, 2012, no. 5, pp. 6–9.
- Polyanskaya I.G., Pakhomov V.P., Fadeichev A.F. Nekotorye aspekty sovershenstvovaniya litsenzionnogo dostupa k nedram [Some aspects of improving license access to subsoil]. *Ekonomika regiona*, 2008, no. 6, pp. 233–240.
- Barton. B.J. *Canadian mining law*. Canada, Calgary, Canadian Institute of Resources Law, 1993. 153 p.
- U.S. Code/ T.30 Mineral Lands and Minig. W-n: Gov.print.off., 2002. 968 p.
- Forbes J.R.S., Lang A.G. *Australian Mining and Petroleum Laws*. Sydney, Butterworths, 1987. 375 p.
- Orlov V.P., Sergeev Yu.S., Khakimov B.V. Zakonodatelnoe obespechenie individualnoy staratelskoy dobychi [Legislative ensuring of individual prospecting production]. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2009, no. 3, pp. 87–89.
- Popov A.B. Naibolee vazhnye voprosy v gornodobyvayushchem komplekse Amurskoy oblasti [The most important issues in a mining complex of the Amur region]. *Federalny informatsionno-analiticheskiy almanakh «Rossiya: vlast, ekonomika, obshchestvo»* [Federal information and analytical year-book «Russia: power, economics, society»]. Moscow, Region-press Kniga, 2009. pp. 68–69.
- Stefanovskaya N.A., Krivoshechpova E.V. Zakonotvorchestvo kak forma dokumentovedcheskoy deyatelnosti [Lawmaking as a form of document science activity]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 6, pp. 149–152.

Received: 25 March 2013.

УДК 550.4:551.86

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПАЛЕОЭСТУАРНОГО БАССЕЙНА ВАНЬЕГАНСКОЙ СТРУКТУРЫ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Афонин Игорь Викторович,

инженер-исследователь центра коллективного пользования
«Аналитический центр геохимии природных систем» Национального
исследовательского Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: heaven05@list.ru

Татьянин Геннадий Михайлович,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. палеонтологии и исторической
геологии Национального исследовательского Томского государственного
университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36.
E-mail: gmt@ggf.tsu.ru

Тишин Платон Алексеевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. петрографии Национального
исследовательского Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: labspm@ggf.tsu.ru

Актуальность работы обусловлена сложностью создания седиментационных и фациальных моделей для верхних пластов покурской свиты.

Цель работы: на основании результатов факторного анализа по петрогенным оксидам и геохимическим индикаторам осадков палеоэстуарного бассейна выделить фациальные зоны и проследить их пространственно-временное развитие, установить основные петрогеохимические факторы, влияющие на химизм осадка.

Методы исследования: рентгенофлуорисцентный анализ и ICP-MS с индуктивно связанной плазмой; статистическая обработка данных с использованием программного пакета Statistica 6.0.

Результаты. По результатам факторного анализа было показано, что вариативность содержаний петрогенных оксидов зависит от особенностей минерального состава осадка. Неоднородность распределения микропримесей на 20–25 % обусловлена накоплением микроэлементов на геохимических барьерах и подчеркивает вариации физико-химических особенностей pH и Eh среды, которые контролируют процессы взаимодействия вод с твердым осадком. На основании проведенной дискриминации по геохимическим и петрохимическим факторам было выделено шесть фациально-геохимических зон, отвечающих руслам (дельтам), старицам, приливно-отливным зонам, лиманам, ближнему шельфу, областям взаимодействия пресных и соленых вод. Также выявлена латеральная и вертикальная зональность исследуемой структуры, выраженная в переходе континентальных фаций в морские. Установлено, что петрогеохимическая зональность связана с изменениями направления сноса вещества, составом вод, гидродинамической активностью среды осадконакопления и физико-химическими условиями седиментации. Максимальное влияние континентального сноса наиболее четко выражено в осадках русловых и старичных фаций и частично в областях взаимодействия системы море–суша. Вариации физико-химических условий (pH и Eh среды) наиболее четко выражаются в уменьшении кислотности и окислительно-восстановительного потенциала в ряду от континентальных к шельфовым фациям.

Ключевые слова:

Покурская свита, геохимические индикаторы, петрогеохимические фации, зональность, палеоэстуарный бассейн.

Введение

Устьевые области занимают менее 10 % поверхности океана [1]. В данных областях выделяются дельтовые и эстуарные зоны, которые характеризуются интенсивной латеральной и вертикальной изменчивостью и сходным набором литолого-фациальных комплексов, что затрудняет их диагностику.

Учитывая различную активность среды в условиях осадкообразования дельтовых и эстуарных систем предполагается, что важное значение могут приобретать геохимические характеристики осадочных пород, отражающие условия их накопления в системе море–суша. В этой связи нами предпринята попытка выделения петрогеохимических неоднородностей палеоэстуарного бассейна.

В качестве объекта исследований выбрана верхняя часть покурской свиты (K_2cm_2), фиксирующая бореальную верхнесеноманскую трансгрессию на фоне общей тенденции потепления [2, 3].

Литологический толща представлена неравномерным переслаиванием песков, слабосцементированных песчаников, глин от алевритистых до алевритовых, глинистых известняков. В нижней части песчаные породы более крепосцементированные аргиллитоподобные глины. Накопление данных осадков происходило в условиях морских и прибрежно-континентальных фаций. Для верхов покурской свиты характерен обильный растительный детрит, обугленные обрывки растений, линзы бурых углей, включения и присыпки пирита, конкреции сидерита [4].

Особенности строения

Эстуарная природа изученного бассейна определяется по характеру преобладающего морского состава комплекса фораминифер, текстурно-структурным особенностям осадочных пород и морфологии алеврито-глинистых и псаммитовых тел [5] (рис. 1).

Временное развитие данной системы фиксируется тремя основными этапами, выраженными в формировании трех литологически контрастных горизонтов с определенными микрофаунистическими комплексами. Нижний комплекс *Saccamina micra*, *Ammomarginulina sibirica* характеризуется двучленным строением [5]. В южной части площади он представлен песчаными осадками с маломощными, до 1,5 м, прослоями алевритов и глин. Текстурно-структурные особенности позволяют относить их к русловым, дельтовым и прибрежно-морским группам фаций. На севере структуры обнаруживаются преимущественно глинистые, алеврито-глинистые и карбонатные породы. Они несут в себе признаки морского генезиса и относятся к фациям лагун, заливов и ближнего шельфа [4].

Выше по разрезу залегает комплекс *Gaudryinopsis nanushukensis elongates* [5]. Литологически он является однородным по всей площади Ван-Еганской структуры и представлен карбонатно-глинистыми образованиями малоподвижного бассейна с повышенной соленостью.

Третий комплекс – *Trochammina wetteri tumida*, *Verneuilinoides kansasensis* [5] – характеризуется максимальной неоднородностью состава отложений, которая выражена в сложном чередовании алевритовых, псаммитовых и глинистых разностей. Для них характерна высокая вариативность структурно-текстурных особенностей, которые

предполагают выделение зон приливных каналов, приливо-отливных течений, малоподвижного мелководья и аккумулятивных форм прибрежно-морской области.

Методика исследований и полученные результаты

В основу работы было положено 125 определений содержаний петрогенных окислов, методом РФА и микроэлементного состава с помощью ICP-MS.

Исследования проводились в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского Государственного университета. Рентгенофлуорисцентный анализ проводился на приборе OXFORD ED 2000 – энергодисперсионный рентгенофлуорисцентный спектрометр фирмы «OXFORD Instruments Analytical». В качестве внутренних и корректирующих стандартов были использованы BCR-2, СГХМ-1, СГ-3, ССЛ-1. Масс-спектральное определение содержания элементов в анализируемых образцах проводят на аппарате Agilent 7500сх, Agilent Technologies. Съемка проводилась по оригинальной методике Ю.В. Аношкиной [6, 7]. Качество полученных результатов оценивалось на основании стандартов BCR-2, СГХМ-1, СГ-3, ССЛ-1.

По особенностям химического состава выделяются сиалиты и их железистые карбонатолиты и карбонатные образования, которые отличаются друг от друга по содержанию SiO_2 , CaO и Fe_2O_3 . Микроэлементный состав соответствует типичным осадочным породам. Средние значения петрогенных оксидов и геохимических коэффициентов основных литологических типов горных пород представлены в табл. 1. Исследуемые породы характеризуются высокой вариативностью показателей Sr/Ba и Mn/U , значения которых увеличиваются в ряду песчаники – алевролиты – карбонатно-глинистые образования [8–11]. В целом по разрезам

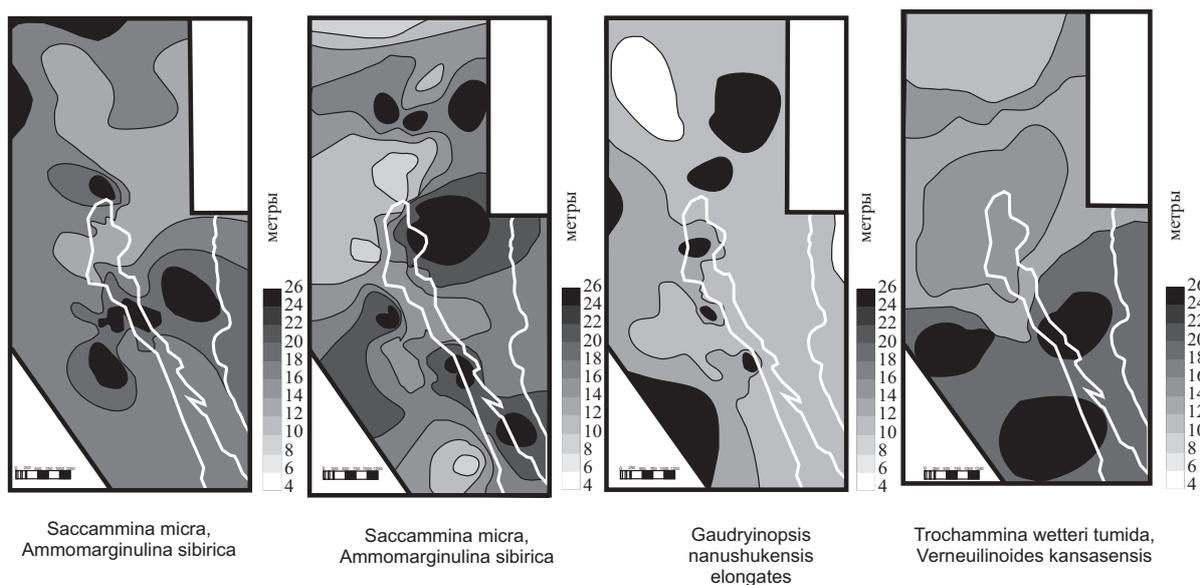


Рис. 1. Карты общей песчаности по микрофаунистическим горизонтам. Белым обозначен контур палеокосы

Fig. 1. Maps of common sand content along the microfauna horizons. Spit contour is marked in white

отсутствуют ярко выраженные признаки латеральной и вертикальной изменчивости осадков. Для их диагностики был проведен факторный анализ, позволивший обнаружить определенные закономерности.

Следующий шаг заключался в проведении статистической обработки данных с помощью факторного анализа. Сущность данного метода заключается в построении собственных векторов исходной ковариационной матрицы, длина которых отображает их относительный вклад в суммарную дисперсию выборки [12]. Число векторов (компонент) соответствует количеству исходных параметров. При моделировании количество компонент ограничивается до 3–5, суммарная нагрузка которых составляет 75–91 %. Структура каждой компоненты или ее координаты определяются коэффициентами корреляции отдельных переменных и, по существу, фиксирует роль взаимных вариаций исследуемых параметров. Факторный анализ был проведен по двум основным выборкам: по результатам силикатного анализа и геохимическим индикаторам. Результаты представлены в табл. 2, 3.

Таблица 1. Средние содержания петрогенных оксидов (мас. %) и ряда химических элементов (г/т) в основных литологических типах осадков верхов покурской свиты

Table 1. Average content of petrogenic oxides (wt. %) and a number of chemical elements (g/t) in the main lithological types of sediments in upper parts of Pokurskaya strata

Элемент Element	Песчаники Sandstones	Алевриты Siltstones	Карбонатно-глинистые Carbonate-argillaceous	Элемент Element	Песчаники Sandstones	Алевриты Siltstones	Карбонатно-глинистые Carbonate-argillaceous
Na ₂ O	1,58	1,55	1,55	La	25,09	27,53	30,51
MgO	0,53	0,47	0,49	Ce	56,93	65,54	67,70
Al ₂ O ₃	20,60	19,60	21,60	Pr	5,92	6,53	7,35
SiO ₂	61,28	58,03	55,37	Nd	22,65	25,35	27,34
P ₂ O ₅	0,07	0,07	0,07	Sm	4,43	5,00	5,32
K ₂ O	2,13	2,54	2,94	Eu	1,01	1,09	1,09
CaO	0,44	0,65	0,65	Gd	3,91	4,35	4,63
TiO ₂	1,02	0,96	0,96	Tb	0,60	0,68	0,72
MnO	0,11	0,10	0,25	Dy	3,52	3,91	4,15
Fe ₂ O ₃	6,78	7,09	8,95	Ho	0,72	0,80	0,84
LOI	7,55	8,55	8,55	Er	2,04	2,24	2,38
Сумма	99,90	99,60	101,38	Tm	0,31	0,34	0,36
Li	71,92	79,22	95,95	Yb	2,01	2,20	2,31
Sc	12,35	13,99	15,48	Lu	0,30	0,33	0,35
V	113,77	124,08	118,75	Hf	3,67	3,83	4,03
Cr	110,15	123,96	122,25	Ta	0,99	1,02	1,11
Co	15,15	17,78	25,07	Pb	18,83	19,50	19,75
Ni	56,08	65,62	79,01	Th	7,76	8,00	9,07
Cu	26,80	34,00	30,79	U	2,62	2,88	3,13
Zn	68,75	81,14	89,19	Y	17,54	20,15	21,76
Ga	13,72	33,69	44,43	Zr	135,76	142,23	151,22
Rb	68,11	70,73	80,19	Nb	12,74	14,07	14,86
Sr	106,54	134,01	148,50				
Ba	319,91	361,67	453,33	Cs	5,43	5,49	5,37

Неоднородность распределения основных петрогенных оксидов на 76 % определяется четырьмя основными факторами (табл. 2). Первый (петрохимический фактор – ПФ1) отражает обратные зависимости между SiO₂ и оксидами когерентными фосфатам и карбонатам P₂O₅, CaO, MnO, Fe₂O₃. Это позволяет интерпретировать его как индикатор интенсивности карбонатизации терригенных осадков. Наблюдаемая при этом значимая положительная нагрузка K₂O (0,65) и Na₂O (0,57) указывает на высокую активность щелочей при развитии аутигенной минерализации, подчеркивая морской режим седиментации [13].

Второй фактор (ПФ2) определяется обратным накоплением оксидов магния, кальция и калия по отношению к MnO, TiO₂, Al₂O₃ на фоне незначимых вариаций SiO₂ и P₂O₅. Подобная структура предполагает латеральную дифференциацию осадков в зоне перехода суша–море. Накопление кальция и магния в совокупности с калием подчеркивают восстановительную карбонатизацию в щелочной среде ближнего шельфа. Совместное концентрирование Ti, Mn и Al предполагает соосаждение глин и акцессорных минералов (рутил, ильменит, магнетит) в зонах терригенной разгрузки [14].

Третий фактор (ПФ3) фиксируется обратной зависимостью Al₂O₃, LOI по отношению к SiO₂. Он отражает соотношение в осадках обломочной и глинистой составляющих.

Структура четвертого фактора (ПФ4) связывается с обратной зависимостью элементов когерентных полевым шпатам Al, Na, K по отношению к величине LOI. Что позволяет интерпретировать данный фактор, как отражение степени выветривания или результат рециклинга осадков.

Неоднородность распределения геохимических индикаторов, выраженная в структуре факторных нагрузок, приведена в табл. 3.

Первый фактор (геохимический фактор – ГФ1) характеризуется обратной корреляцией Mn/U по отношению к параметрам распределения редкоземельных элементов (S?TR, La/Yb, Gd/Yb). Подобная структура демонстрирует дискретное распределение хемогенной карбонатно-фосфатной минерализации к общему обогащению лантаноидами, которые фиксирует дифференциацию обломочного материала [15].

Второй фактор (ГФ2) выражен в обратной корреляции двух комплексов: Gd/La+Sr/Ba+Mn/U и U/Th+SiO₂/Fe₂O₃. Четкая прямая зависимость обогащения средними редкими землями пород с показателями солености и карбонатизации отражает хемогенное накопление средних лантаноидов структурами карбонатов в морских условиях [16–18]. Прямая корреляция показателя окисления (U/Th) и общей терригенной нагрузки (SiO₂/Fe₂O₃) позволяет рассматривать отрицательные значения данного фактора как индикатор континентального сноса.

Третий фактор (ГФ3) демонстрирует обратную связь Fe/Mn по отношению к Ce/Ce*, Mn/U и

Таблица 2. Результаты факторного анализа петрогенных оксидов

Table 2. Results of the factor analysis of petrogenic oxides

Фактор Factor	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Значимость фактора, % Factor value, %
ПФ1	-0,77	0,39	-0,21	0,89	0,27	0,82	0,74	0,57	0,65	0,9	0,23	0,37
ПФ2	0,05	-0,82	-0,43	-0,11	0,74	0,31	-0,58	0,05	0,43	0,02	0,09	0,17
ПФ3	-0,6	-0,17	0,47	-0,02	0,04	-0,05	-0,11	-0,29	-0,09	-0,15	0,8	0,13
ПФ4	-0,18	-0,18	0,71	-0,03	-0,03	-0,07	-0,13	0,3	0,36	-0,03	-0,47	0,09

Таблица 3. Результаты факторного анализа геохимических индикаторов

Table 3. Results of the factor analysis of geochemical indicators

Фактор Factor	ΣTR	Ce/Ce*	Eu/Eu*	La/Yb	Sr/Ba	U/Th	Fe/Mn	SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	Mn/U	Gd/La	Gd/Yb	Ti/Zr	Значимость фактора, % Factor value, %
ГФ1	0,81	-0,23	0,5	0,89	-0,24	-0,19	0,09	0,06	-0,42	-0,19	0,9	0,01	0,34
ГФ2	0,39	-0,14	0,1	-0,22	0,46	-0,47	-0,34	-0,82	0,46	0,82	0,27	-0,4	0,22
ГФ3	0,07	0,48	0,08	0,17	-0,39	0,54	-0,75	-0,3	0,42	-0,08	0,13	0,33	0,14
ГФ4	0	0,74	0,3	0,06	0,56	0,45	0,4	-0,06	-0,21	0,13	0,13	-0,14	0,12

U/Th. Это интерпретируется как показатель редокс – потенциал среды, при этом положительные значения будут отвечать окислительным обстановкам, а отрицательные – восстановительным [19].

Четвертый фактор (ГФ4) характеризуется отрицательной корреляцией Mn/U по отношению к Ce/Ce* и Sr/Ba. Она может быть интерпретирована как индикатор изменения солёности бассейна в результате смешения солёных и пресных вод и отражать барьерную карбонатизацию, на фоне изменения pH [20]. В результате его положительные значения отвечают pH > 5, а отрицательные – pH < 9.

Достоверность приведенной интерпретации подчеркивается наличием значимых корреляционных зависимостей абсолютных значений факторных нагрузок, полученных по выборкам петрогенных оксидов и геохимических индикаторов (рис. 2). Так как в основу данной интерпретации заложены показатели вариативности минерального состава осадков и геохимические показатели уровня солёности, изменения окислительно-восстановительного потенциала и кислотно-щелочности среды седиментации, была предпринята попытка дискриминации геохимических фаций на

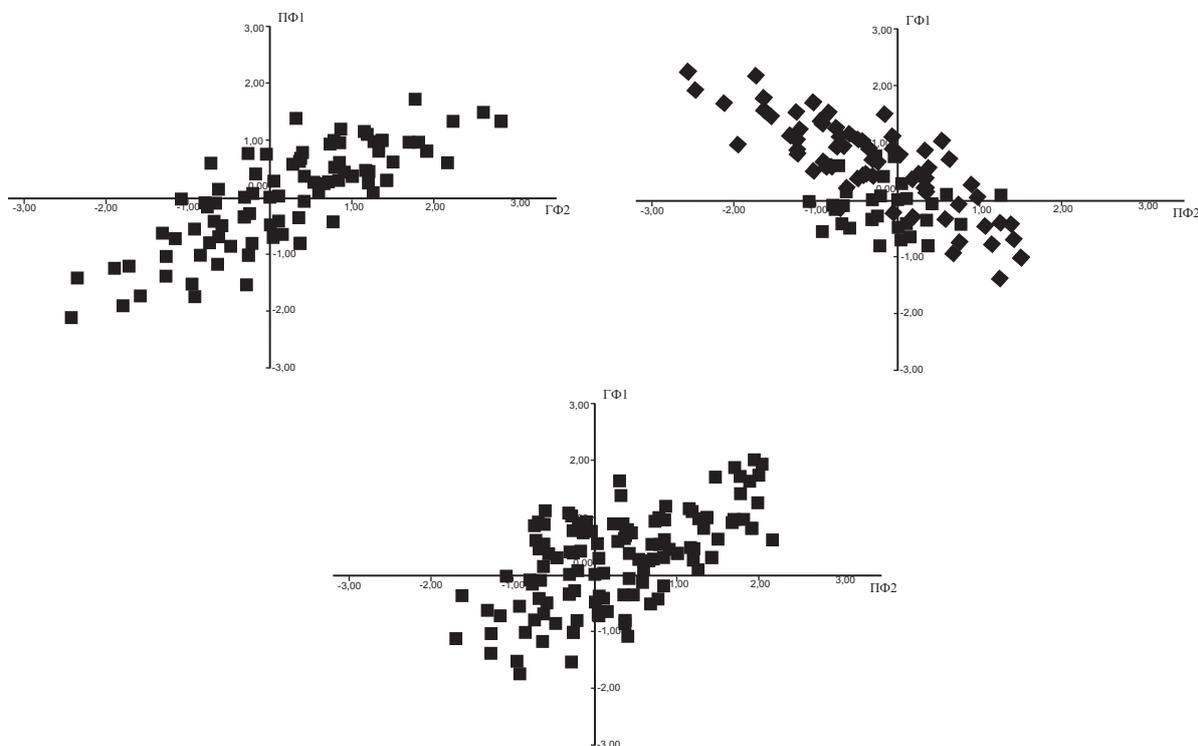


Рис. 2. Корреляционные зависимости факторных нагрузок

Fig. 2. Correlation dependences of factor loads

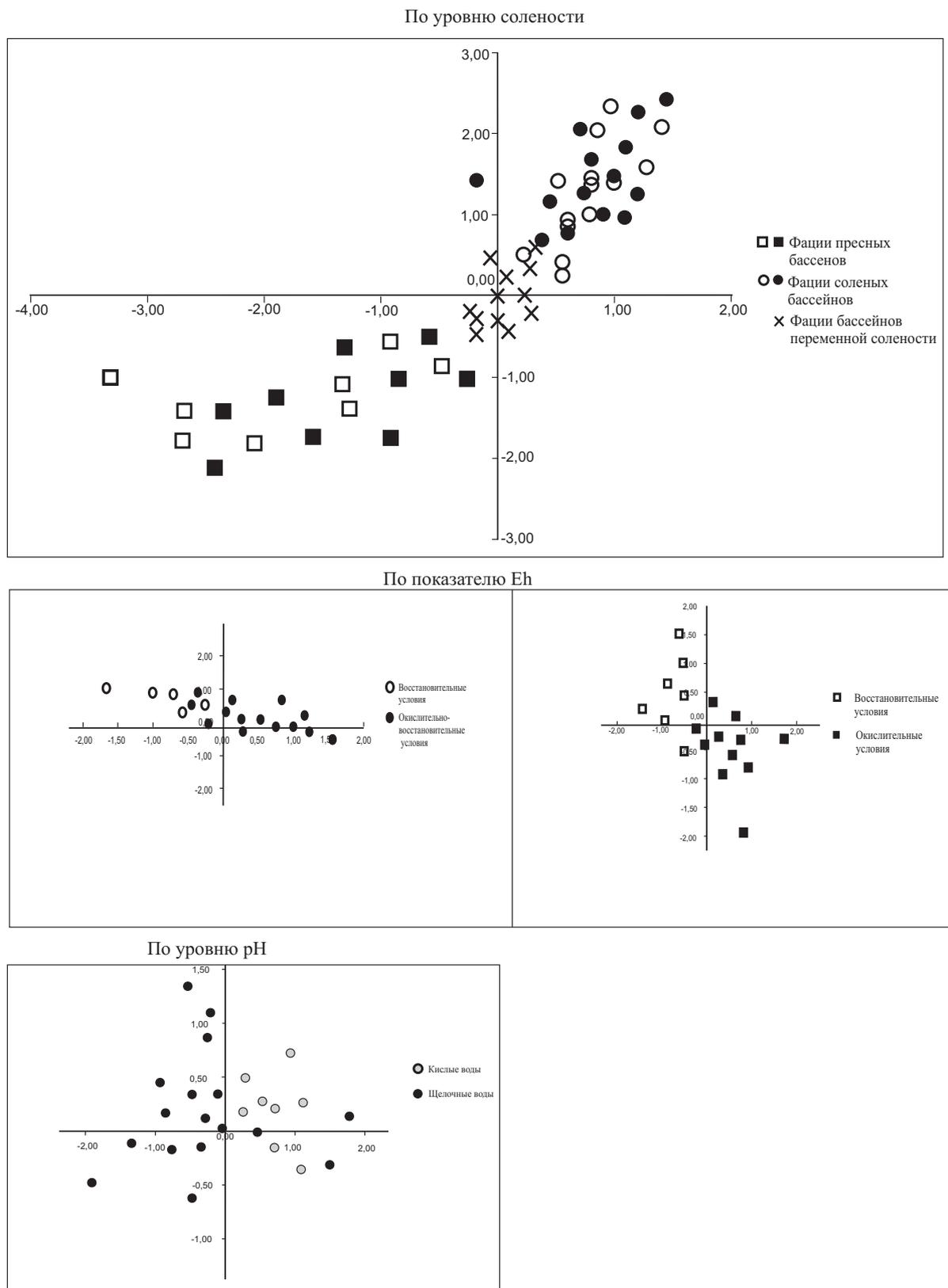


Рис. 3. Дискриминация верхнесеноманских осадков по уровню солёности среды седиментации, pH и Eh

Fig. 3. Discrimination of Upper-Cenomanian sediments according to sedimentation media salinity degree, pH and Eh

основании абсолютных значений факторных нагрузок.

Первым шагом при выделении геохимических фаций является разделение морских и континентальных отложений по уровню солености среды седиментации. Приведенные выше исследования показали, что эти параметры отражаются в структурах фактора ГФ2 и компоненты ПФ1, фиксирующей степень прибрежно-морской карбонатизации. Дискретное распределение значений факторных нагрузок по этим компонентам позволяет выделить группы фаций соленых бассейнов (морских и прибрежно-морских: ГФ2 и ПФ1 от 2,5 до 0,5), бассейнов переменной солености (область взаимодействия морских и пресных вод: ГФ2 от 0,5 до -0,5 и ПФ1 от 0,5 до -0,5) и пресных бассейнов (континентальных: ГФ2 от -0,5 до -2,5 и ПФ1 от -0,5 до -2,5). Следующим шагом при фацальной геохимической дискриминации является разделение осадков по качественным оценкам окислительно-восстановительных параметров (ГФ3, ПФ2), индикаторов кислотности – щелочности (ГФ4, ПФ2) среды седиментации (рис. 3).

Таким образом, на основании значений факторных нагрузок компонент (ГФ3, ПФ2) группа фаций соленых и пресных бассейнов были разделены на две подгруппы каждая. Первая включает в себя отложения, характеризующиеся окислительно-восстановительным (переменным) и восстановительным потенциалами (ГФ3 от -0,5 до -2,5). Осадки группы пресных бассейнов обнаруживают окислительный (ГФ3 от 0,5 до 2,5) и восстановительный потенциалы (рис. 3).

При этом следует отметить, что дискриминация на основе показателя рН была проведена только для отложений переменного потенциала, четко разделяющихся по составу вод на щелочные (ГФ4 2,5 от до 0, ПФ2 от 2,5 до 0) и кислые (ГФ4 от 0 до -2,5 и ПФ2 от -0,5 до -2,5).

На основании приведенной дискриминации в пределах Ваньеганской структуры установлено шесть основных фацально-геохимических зон, соответствующие главным палеогеографическим элементам: руслам (дельтам), старицам, приливо-отливным зонам, лиманам, ближнему шельфу, областям взаимодействия пресных и соленых вод. Каждая из выделенных фацальных групп имеет четкую пространственно-временную позицию (рис. 4).

Осадки русловых фаций слагают основание разреза горизонта *Saccamina micra*, *Ammomarginulina sibirica*. Их формирование протекало в пресном или слабо соленом бассейне (Sr/Ba до 0,2) в окислительных условиях и переменных значениях рН. Также отмечается аркозовый профиль отложений.

Осадки старичных фаций установлены в восточной части верхнего сегмента горизонта *Saccamina micra*, *Ammomarginulina sibirica*. Их образование происходит в среде кислотно-щелочного состава при резко восстановительных условиях. На западе эти образования сменяются осадками береговой линии или зон смешения морских и континентальных вод. Они характеризуются значительными вариациями физико-химических показателей (ГФ4 от -2 до 2 и ПФ2 от -2 до 2), отражаю-

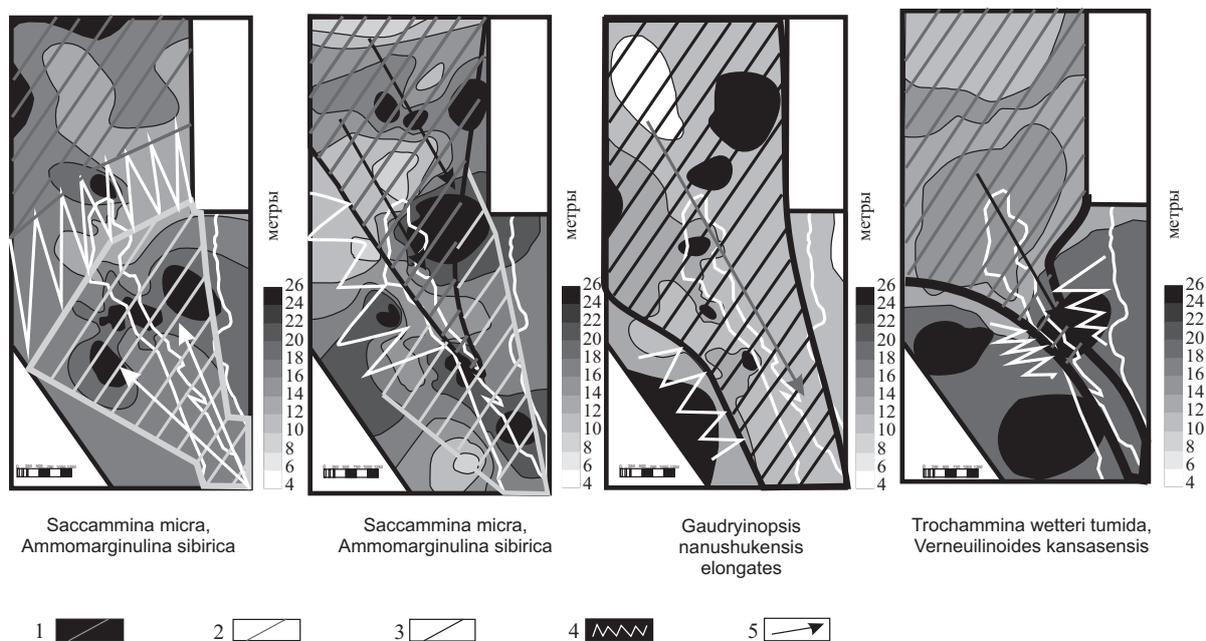


Рис. 4. Палеогеографические реконструкции по микрофаунистическим горизонтам: 1) эстуарные; 2) речные и дельтовые; 3) морские; 4) прибрежно-морские осадки; 5) преобладающее направление потока

Fig. 4. Paleogeographic reconstruction along the microfauna horizons: 1) estuarine; 2) fluvial-deltaic; 3) marine; 4) coastal-marine sediments; 5) predominate flow direction

щими переменный состав вод и существенные колебания рН-Eh режимов (рис. 2). Эти осадки слагают верхнюю часть горизонта *Saccamina micra*, *Ammotarginulina sibirica*.

В составе горизонта *Trochammina wetteri tumida*, *Verneuilinoides kansasensis* выделяются зоны распространения лиманных, приливно-отливных и шельфовых осадков. Лиманы образуют узкую северо-западную зону в южной части структуры. Накопление терригенного материала в лиманах осуществляется в соленом бассейне (Sr/Ba до 0,37) с кислым составом вод (ГФ4 от 0 до -2,5), на фоне широкой вариативности Eh (ГФ3 от -2 до 2), которая может быть связана с термодинамической неоднородностью зоны формирования осадка. Это может быть обусловлено выделением гумусовых кислот при разложении органического вещества. В результате этого отмечается подкисление придонных вод на общем восстановительном фоне среды [12, 13].

Отложения шельфовых и приливно-отливных зон слагают основной объем выделенных стратифицированных комплексов.

Физико-химические условия образования фаций приливно-отливных зон характеризуются повышенной щелочностью среды, переменными значениями окислительно-восстановительного потенциала и солёности бассейна.

Осадки шельфовых зон вскрываются на севере структуры. Их литогеохимические характеристики подчеркивают восстановительные условия (ГФ3 = -2,5 -0), щелочную среду (ГФ4 от 0 до 2,5) и повышенную солёность бассейна седиментации.

Выводы

Проведенные исследования показали, что вариации содержаний петрогенных окислов определяется особенностями минерального состава осадков. Неоднородность распределения микропримесей на 20–25 % обусловлена накоплением микроэлементов на геохимических барьерах и подчеркивает вариации физико-химических особенностей

рН и Eh среды, которые контролируют процессы взаимодействия вод с твердым осадком.

Особенности петрогеохимической зональности изученного эстуарного бассейна обнаруживают ее четкую связь с основными палеогеографическими элементами, выраженными в изменениях направления сноса вещества, гидродинамической активности среды осадконакопления, физико-химических условиях седиментации и состава вод.

Максимальное влияние континентального сноса наиболее четко выражено в осадках русловых и старичных фаций и частично в областях взаимодействия системы море-суша. Отложения имеют аркозный профиль преимущественно кварцевого и алевроитового состава. Изменение направленности потоков в приливно-отливных зонах способствует увеличению доли переработанного терригенного материала, что отражается в, преимущественно, кварцевом составе и гидролизатом профиле осадков.

Вариации физико-химических условий (рН и Eh среды) наиболее четко выражаются в уменьшении кислотности и окислительно-восстановительного потенциала в ряду от континентальных к шельфовым фациям. Это находит свое отражение в изменении состава глинистой составляющей терригенных пород от *хлорит-каолинит-гидрослюдистой ассоциации в дельтовых фациях к иллит-каолинит-хлорит-монтмориллонитовой – в прибрежно-морских зонах*, которые на шельфе сменяются *каолинит-монтмориллонитовыми комплексами*.

Важное значение при реконструкции палеоэстуарных бассейнов приобретает диагностика областей смешения пресных и соленых вод. Полученные данные позволяют ограничить области их влияния по значениям ГФ4 и ПФ2 от -0,5 до 0,5. Промежуточные значения фиксируют зоны смешения вод, что в условиях низкой гидродинамики лиманов способствует интенсивной барьерной солевой минерализации и выражается в образовании Mn-содержащих карбонатно-фосфатных комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. – 1994. – Т. 34. – № 5. – С. 735–747.
2. Подобина В.М. Фораминиферы и зональная стратиграфия верхнего мела Западной Сибири. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989. – 232 с.
3. Подобина В.М. Фораминиферы и биостратиграфия верхнего мела Западной Сибири. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 388 с.
4. Александрова Г.Н., Космынин В.А., Постников А.В. Стратиграфия и условия седиментации меловых отложений южной части Варьеганского мегавала (Западная Сибирь) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2010. – Т. 18. – № 4. – С. 65–91.
5. Подобина В.М. Новые сведения по фораминиферам и биостратиграфии верхнего сеномана северного района // Вестник томского государственного университета. – 2012. – Т. 361. – № 6. – С. 182–187.
6. Аношкина Ю.В. Разработка методики определения рассеянных элементов в геологических образцах методом масс-спек-

7. Аношкина Ю.В., Никитина Е.И. Масс-спектральное (с индуктивно-связанной плазмой) определение редкоземельных элементов, циркония, гафния, ниобия и тантала в геологических образцах с применением микроволнового разложения // Петрология магматических и метаморфических комплексов: материалы Всерос. петрографической конф. – Томск, 2009. – С. 9–12.
8. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – 742 с.
9. Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2005. – 289 с.
10. Интерпретация геохимических данных / под. ред. Е.В. Склера. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 288 с.

11. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. – СПб.: Наука, 2000 – 479 с.
12. Дэвис Дж.С. Статистический анализ в геологии. В 2-х кн. – М.: Недра, 1990. – Кн. 1. – 800 с.
13. Marine geochemistry / ed. H.D. Schulz, M. Zabel. – Berlin: Springer, 2000. – 574 p.
14. Ohta A., Kawabe I. Theoretical study of tetrad effect observed in REE distribution coefficients between marine Fe-Mn deposit and deep seawater, and in REE (III)-carbonate complexation constants // *Ibid.* – 2000. – V. 34. – P. 455–473.
15. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 267 с.
16. Boyle E.A., Edmond J.M., Sholkovitz E.R. The mechanism of iron removal in estuaries // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1977. – V. 41. – № 9. – P. 1313–1324.
17. Feijtel T.C., DeLaune R.D., Patrick W.H.Jr. Biogeochemical control on metal distribution and accumulation in Louisiana sediments // *J. Environ. Quality.* – 1988. – V. 17. – № 1. – P. 88–94.
18. Sholkovitz E., Szymczak R. The estuarine chemistry of rare earth elements: Comparison of the Amazon, Fly, Sepik and Gulf of Papua system // *Earth and Planet. Sci. Lett.* – 2000. – V. 179. – P. 299–309.
19. Haley B.A., Klinhammer G.P., McManus J. Rare earth elements in pore of marine sediments // *Ibid.* – 2004. – V. 68. – № 6. – P. 1265–1279.
20. Luo Y.-R., Byrne R.H. Carbonate complexation of yttrium and the rare earth elements in natural waters // *Geochim. et cosmochim. Acta.* – 2004. – V. 68. – № 4. – P. 691–699.

Поступила 19.05.2014 г.

UDC 550.4:551.86

GEOCHEMICAL HETEROGENEITY OF PALEOESTUARINE BASIN OF VANEGANSKAYA STRUCTURE (WESTERN SIBERIA)

Igor V. Afonin,

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: heaven05@list.ru

Gennadiy M. Tatyandin,

Cand. Sc., National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: gmt@ggf.tsu.ru

Platon A. Tishin,

Cand. Sc., National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: labspm@ggf.tsu.ru

Relevance of the work is determined by the complexity of creating sedimentary and facies models for the upper layers of the Pokursky suite.

The aim of the research is to determine facies zones based on the factor analyses of the major oxides and geochemical indicators of the sediments of paleoestuarine basin and to observe their space-time evolution; to indicate the main factors influencing the sediment chemistry.

The research methods: X-ray fluorescence (XRF) and inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) analyses, statistical data processing using the software package Statistica 6.0.

The results. The factor analysis demonstrated that the variability in the contents of major oxides depends on the features of the mineral composition of sediment. 20–25 % of trace elements have a heterogeneous distribution which is caused by the accumulation of trace elements at the geochemical barriers. This fact indicates the variations of physical and chemical features of pH and Eh, which control the processes of water–sediment interaction. Based on the discrimination on geochemical and petrochemical factors the authors determined six facies-geochemical zones which correspond to beds (delta), oxbows, tidal zones, silted estuaries, shelf and areas of interaction of fresh and salt water. The lateral and vertical changes of the structure under study were found out. This shows the transition of continental facies into marine ones. It was ascertained that the petrogeochemical zonation is associated with the changes in substance ablation direction, water structure, hydrodynamic activity of depositional environment and physico-chemical conditions of sedimentation. The maximum influence of continental ablation is more clearly expressed in sediments of river and oxbow facies, and partially in the interaction areas of sea–land system. The variations of physico-chemical conditions (pH and Eh of the medium) are most distinctly expressed in reduction of acidity and redox potential from continental to shelf facies.

Key words:

Pokurskaya strata, geochemical indicators, petrogeochemical facies, zonation, paleoestuarine basin.

REFERENCES

1. Lisitsyn A.P. Marginalny filtr okeanov [Marginal Filter of the Oceans]. *Okeanologiya*, 1994, vol. 34, no. 5, pp. 735–747.
2. Podobina V.M. *Foramenifery i zonalnaya stratigrafiya verkhnego mela Zapadnoy Sibiri* [The Upper Cretaceous foraminifers and zonal stratigraphy of the Western Siberia], Tomsk, TGU Press., 1989. 232 p.
3. Podobina V.M. *Foramenifery i biostratigrafiya verkhnego mela Zapadnoy Sibiri* [The Upper Cretaceous foraminifers and biostratigraphy of the Western Siberia]. Tomsk, NTL Publ., 2000. 388 p.
4. Aleksandrova G.N., Kosmynin V.A., Postnikov A.V. Stratigrafiya i sedimentatsiya melovykh otlozheniy yuzhnoy chasti Varyeganskogo megavala (Zapadnaya Sibir) [Stratigraphy and sedimentational environment of the Cretaceous deposits from the southern part of the Varyeganskiy megaswell (West Siberia)]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyaziya*, 2010, vol. 18, no. 4, pp. 65–91.
5. Podobina V.M. Novye svedeniya po foraminiferam i biostratigrafii verkhnego senomana severnogo rayona [New data on upper cenomanian foraminifers and biostratigraphy of northern district of Eastern Siberia]. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, vol. 361, no. 6, pp. 182–187.
6. Anoshkina Yu.V. Razrabotka metodiki opredeleniya rasseyannykh elementov v geologicheskikh obraztsakh metodom masspektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy [Development of methods for determining trace elements in geological samples by ICP-MS]. *Problemy geologii i osvoenie nedr. Trudy XIV mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchennykh* [XVIII International Scientific Symposium in Honor of Academician M.A. Usov: Problems of Geology and Subsurface Development]. Tomsk, 2010. Vol. 1, pp. 78–79.
7. Anoshkina Yu.V., Nikitina E.I. Mass-spektralnoe (s induktivno-svyazannoy plazmoy) opredelenie redkozemelnykh elementov, tsirkoniya, gafniya, niobiya i tantala v geologicheskikh obraztsakh s primeneniem microvolnovogo razlozheniya [Determination of REE, Zr, Hf, Nb and Ta by ICP-MS with microwave analysis in geological samples]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov: materialy Vserossiyskoy petrograficheskoy konferentsii* [Scientific Conference. Petrology of igneous and metamorphic complexes]. Tomsk, 2009. pp. 9–12.
8. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geokhimicheskie indicatory lithogeneza* [Geochemical indicators of lithogenesis]. Syktyvkar, Geoprint, 2011. 742 p.
9. Maslov A.V. *Osadochnye porody: metody izycheniya i interpretatsiya poluchennykh dannykh* [Sedimentary rocks: methods of study and interpretation of the data]. Yekaterinburg, UGGU Press, 2005. 289 p.
10. *Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh* [Geochemical data interpretation]. Ed. by E.V. Sklyarov. Moscow, Internet Inzhiring Publ., 2001. 288 p.
11. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy litokhimii* [Basis of lithochemistry]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000. 479 p.
12. Devis Dzh. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* [Statistical data analysis in geology]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 800 p.
13. *Marine geochemistry*. Ed. H.D. Schulz, M. Zabel. Berlin, Springer, 2000. 574 p.
14. Ohta A., Kawabe I. Theoretical study of tetrad effect observed in REE distribution coefficients between marine Fe-Mn deposit and deep seawater, and in REE (III)-carbonate complexation constants. *Ibid.*, 2000, vol. 34, pp. 455–473.
15. Balashov Yu.A. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov* [Geochemistry of rare earth elements]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 267 p.
16. Boyle E.A., Edmond J.M., Sholkovitz E.R. The mechanism of iron removal in estuaries. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1977, vol. 41, no. 9, pp. 1313–1324.
17. Feijtel T.C., DeLaune R.D., Patrick W.H.Jr. Biogeochemical control on metal distribution and accumulation in Louisiana sediments. *J. Environ. Quality*, 1988, vol. 17, no. 1, pp. 88–94.
18. Sholkovitz E., Szymczak R. The estuarine chemistry of rare earth elements: Comparison of the Amazon, Fly, Sepik and Gulf of Papua system. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2000, vol. 179, pp. 299–309.
19. Haley B.A., Klinhammer G.P., McManus J. Rare earth elements in pore of marine sediments. *Ibid.*, 2004, vol. 68, no. 6, pp. 1265–1279.
20. Luo Y.-R., Byrne R.H. Carbonate complexation of yttrium and the rare earth elements in natural waters. *Geochim. et cosmochim. Acta.*, 2004, vol. 68, no. 4, pp. 691–699.

Received: 19 May 2014.

УДК 551.332:550.4(571.151–25)

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕНТОЧНЫХ ГЛИН ГОРНОГО АЛТАЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Рихванов Леонид Петрович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор каф. геоэкологии и геохимии ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: rikhvanov@tpu.ru

Окишев Петр Андреевич,

д-р геогр. наук, профессор, заведующий каф. краеведения и туризма ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.
E-mail: tourism2011@vtomske.ru

Соболева Надежда Петровна,

канд. геогр. наук, доцент каф. геоэкологии и геохимии ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: sobnadi@yandex.ru

Матаев Ельнар Исланович,

студент каф. геоэкологии и геохимии ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: mataevelnar@mail.ru

Актуальность работы обусловлена слабой изученностью ленточных глин приледниковых озер Горного Алтая с геохимической точки зрения и возможностью применения полученных данных для реконструкции динамики гляциальной деятельности на рассматриваемой территории.

Цель работы. Оценка содержания 25 химических элементов, в том числе редких, редкоземельных и радиоактивных; анализ характера распределения их по разрезу ленточных глин и сопоставление цикличности накопления элементов с вероятными источниками поступления в разрез продуктов разрушения горных пород прилегающими ледниками.

Методы исследования: гамма-спектрометрический метод; метод инструментального нейтронно-активационного анализа; анализа матрицы множественной корреляции Ward's методом; анализ статистических параметров; сравнительно-географический метод.

Результаты. Для ленточных глин разреза Чаган-Узун получены параметры распределения 25 химических элементов, определенных методом инструментального нейтронно-активационного анализа, отражающие характер и особенности их накопления в вертикальном профиле ленточных глин, сформированных в древнем приледниковом озере. Установлена общая тенденция поведения химических элементов в процессе формирования ленточных глин, выделены циклы накопления U, Th, редких земель и их отношений, выявлены геохимические ассоциации элементов в разрезе. Значительную роль в формировании геохимических особенностей ленточных глин Алтая играла динамика ледниковой деятельности и режим формировавшейся при этом лимносистемы. Геохимическое исследование осадков, образующихся флювиогляциальных комплексов может быть использовано в качестве одного из вспомогательных критериев при их изучении, а также для реконструкции гляциальных обстановок прошлого.

Ключевые слова:

Ленточные глины, Горный Алтай, ледники, гляциологические реконструкции, геохимические особенности, радионуклиды, редкоземельные элементы.

Постановка проблемы

Ленточные глины относятся к специфическим геологическим образованиям, формирующимся в районах развития ледников. Ленточные глины (на английском varved clays) – отложения приледниковых озёр, состоящие из чередующихся тонких слоев тонкозернистого песка и глины – продуктов осаждения ледниковой мути. Слоистость обусловлена неравномерным привносом обломочного материала в разные сезоны года (песчанистые – летом, глинистые – зимой). Пески и глины постепенно переходят друг

друга и образуют годовые слои, называемые лентами, мощностью от долей миллиметра до нескольких сантиметров; толщина лент обусловлена изменениями погоды и интенсивности таяния ледника. Путём подсчёта этих лент можно определить продолжительность времени образования всей толщи глин. При сопоставлении разрезов ленточных глин, расположенных в различных местах, с краевыми ледниковыми образованиями можно установить возраст отдельных фаз сокращения (таяния) ледникового покрова и скорость отступления края ледника [1].

Ленточные глины распространены в районах активной ледниковой деятельности, на северо-западе и севере Европейской части России, в Скандинавии, на севере Польши, в Германии, на территории Прибалтийских стран, США и Канаде [2–6].

Ленточные глины привлекли к себе внимание ученых более сотни лет назад. Так, шведский ученый Де Геер в XIX в. предложил геохронологический метод – варвохронология [7], метод оценки абсолютного возраста ритмично слоистых ленточных отложений приледниковых озер («варв» от шведского), основанный на подсчёте образующихся пар слоёв (летнего алевритового и зимнего глинистого), позволяющий довольно точно изучить картину отступления последнего ледника, а также исчислить время этого отступления по его отдельным последовательным фазам. Применяя такого рода подсчеты вместе с некоторыми другими приемами, Де Геер и его последователи установили, что со времени начала отступления ледника от южной окраины Скандинавии и до нашего времени (до 1900 г.) прошло около 14000–15000 лет [7].

Рассмотрение ленточных глин проводится в основном с позиции изучения их возраста, литологии, палеонтологии, ископаемых остатков [8–11]. Один из основателей геохимии В. Гольдшмидт предложил использовать ленточные глины для оценки среднего содержания химических элементов на той или иной части континентальной суши, охваченной ледниковой деятельностью. Основанием для этого послужил тот факт, что данные слоистые образования представляют собой отложения тонко диспергированной массы горных пород, которые разрушались ледником, в своём составе отражают весь геохимический спектр пород, принимающих участие в геологическом строении района деятельности ледника. Таким образом, был предложен весьма оригинальный способ определения регионального Кларка земной коры. Полученные В. Гольдшмидтом экспериментальные данные по территории Норвегии подтвердили выдвинутое предположение [12].

Другая попытка использования данных геохимических особенностей ленточных глин для решения вопросов гляциологии, за исключением работы В.В. Бутвиловского [14], в литературе не встречается. Поэтому видится весьма актуальным изучение ленточных глин Горного Алтая, где они имеют достаточно широкое распространение [9–11, 15].

Какой-либо другой информации об использовании геохимических особенностей ленточных глин для решения вопросов гляциологии, за исключением работы В.В. Бутвиловского [14], в литературе не встречается. Поэтому видится весьма актуальным изучение ленточных глин Горного Алтая, где они имеют достаточно широкое распространение [9–11, 15].

Объекты и методы

Несмотря на удовлетворительную геологическую обнаженность Горного Алтая и множество естественных разрезов кайнозойских отложений, изучение их весьма затруднительно. Наиболее известные разрезы, содержащие в своем строении ленточные глины, располагаются в межгорных впадинах, особенно в естественных обнажениях в долинах рек Чаган и Чаган-Узун (рис. 1).

Ленточные глины Горного Алтая встречаются на разных стратиграфических уровнях. По данным определения абсолютного возраста глин, наиболее древние из них (разрез Чаган) характеризуются возрастом 150–260 тыс. лет. Аналогичные образования в районе п. Бельтир (Чаган-Узунский разрез) характеризуются возрастом в 25–32 тыс. лет. Самый молодой возраст имеют ленточные глины Инского разреза, для которого эти показатели составляют 10–15 тыс. лет [15].

Следует отметить, что у современных исследователей ленточных глин Горного Алтая [14, 16] нет единства во взглядах как геологического возраста и скорости осадконакопления, так и разделения «лент» на летние и зимние, а также на причины их формирования.

Ленточные осадки формировались в ингрессионном долинном Чаган-Узунском заливе Чуйского ледниково-подпрудного озера за счёт осаднения обломочного материала из талых ледниковых вод. Оледенение бассейна Чаган-Узуна охватывало 30-километровый участок северного макросклона Южно-Чуйского хребта и значительную часть восточного макросклона Северо-Чуйского хребта. В позднеплейстоценовый максимум площадь сложного Чаган-Узунского ледника превышала 4000 км². Здесь сливались ледники, занимавшие долины Кара-Оюка, Аккола, Талдуры, Джелло и Кыскынора. В верховье этих долин и в настоящее время ледниками занято более 125 км² (рис. 2).

Современное оледенение бассейна Чаган-Узуна представлено 82 ледниками разного морфологического типа и разных размеров. Самым крупным по площади не только здесь, но и на Русском Алтае в целом, является Бол. Талдуриный ледник (площадь более 28 км²) в истоках р. Талдуры. В соседней долине р. Аккола лежит Софийский ледник (площадь более 17 км²). Кроме них в бассейне Чаган-Узуна 6 ледников имеют площадь от 3 до 8 км². Все они связаны с наиболее высокими вершинами (более 3500 м). Высота окончаний языков ледников весьма не одинакова (от 2450 до 3300 м), хотя граница питания (фирновая линия) изменяется только в пределах от 3000 до 3200 м. Это свидетельствует о неодинаковых орографических условиях питания ледников и неодинаковых условиях их динамики при общих изменениях снеговой границы в бассейне.

Низко спускающиеся ледники первыми оккупировали главные долины, а все другие присоединялись к этим основным ледниковым потокам по мере выхода из своих боковых долин. По такой же



Рис. 1. Схема расположения изученных разрезов на территории Горного Алтая

Fig. 1. Plan of the studied section in Gorny Altai



Рис. 2. Схема расположения ледников в бассейнах рек Елангаш, Кара-Оюк, Талдура [17]: 1 – ледники; 2 – водоразделы; 3 – реки; 4 – вершины и их высоты; 5 – местоположение разреза Чаган-Узун

Fig. 2. Plan of glaciers in basins of the rivers Elangash, Kara-Oyuk, Taldura [17]: 1 – glaciers; 2 – water partings; 3 – rivers; 4 – peaks and their heights; 5 – Chang-Uzun section location

схеме увеличивалась и длина ледников. Об этом весьма убедительно свидетельствует удалённость конечных морен последней стадияльной подвижки от концов современных ледников. Например, у ледника Софийского в долине р. Аккола фронт морены XVII–XIX вв. отстоит от конца ледника почти на 3 км, а у ближайшего бокового ледника Удачного – только на 1,5 км. В долине Талдуры фронт морены XVII–XIX вв. отстоит от конца Бол. Талдурина ледника на 2,9 км, а у ближайшего к нему ледника Некрасова в правобережной боковой долине – на 1,6 км.

Все ледники производят эрозионную работу на дне долин и транспортируют продукты эрозии и склоновых процессов к концу ледникового языка. Здесь моренный материал, представляющий собой смесь обломков разных размеров, становится объектом перемыва и насыщения талых ледниковых вод наиболее тонкой фракцией (алевриты, пелиты). Во взвешенном состоянии этот материал переносится на большие расстояния и отлагается в непроточных или слабопроточных водоёмах, формируя ленточно-слоистые осадки, предмет нашего исследования.

Как отмечают И.Д. Зольников и А.А. Мистрюков [16], Чаган-Узунский геологический разрез отражает историю деградации горно-долинного ледника Чаган-Узун в позднем неоплейстоцене по модели последовательного формирования серии цунговых озерных бассейнов между стадияльными конечно-моренными комплексами и краем тающего ледника.

Первоначально нами были обследованы разрезы ленточных глин Алтая с помощью серийно выпускаемого полевого гамма-спектрометра РКП-305 «Карат», позволяющего определять на месте залегания пород содержание U (по Ra), Th на уровне содержания 1 г/т и K на уровне детектирования 0,1 %, что ниже Кларка содержания этих элементов в земной коре, соответственно: 2,8; 10,7. Следует отметить, что данный полевой метод определения радионуклидов, как показывают наши исследования, обладает удовлетворительными метрологическими параметрами [18].

Полученные при этом оценочные средние содержания изученных радиоактивных элементов в ленточных глинах Алтая приведены в табл. 1. Анализ этих данных показал, что истираемый ледниками материал, формирующий ленточные глины, имеет резко отличные характеристики по содержанию радиоактивных элементов.

Эти данные могут свидетельствовать о том, что области разрушения горных пород в процессе движения ледника были сложены породами разного геохимического состава. Высокие значения торий-уранового отношения (Th/U) говорят о том, что в регионе имеются или имелись породы такого состава и возраста, как, например, глубокометаморфизованные докембрийские образования Алтае-Саянской области [18]. На современной геологической карте Горного Алтая геологические образова-

ния с подобными радиогеохимическими характеристиками отсутствуют [19]. Следует предположить, что либо они находятся под толщами ледников и перекрыты моренными отложениями, либо полностью денудированы в процессе ледниковой деятельности.

Таблица 1. Содержание тория, урана (г/т) и их отношение в ленточных глинах Горного Алтая и в террасовых комплексах р. Катунь по данным полевой гамма-спектрометрии

Table 1. Thorium and uranium content (g/t) and their ratio in varved clays in Gorny Altai and in bench complexes of the river Katun according to the data of field gamma-spectrometry

Разрез / Section	Th	U	Th/U
Инской / Inskoy	18,3	1,8	10
Чаган-Узунский / Chagan-Uzun	10,2	2,9	3,5
Чаганский / Chagan	18	2,2	8,2
Яломанский / Yalomansky	10,1	2,4	4,2

Интересно отметить, что современные аллювиальные отложения реки Катунь (разрез в районе р. Яломан) принципиально отличаются от ленточных глин. Радиогеохимические показатели этих террасовых комплексов (табл. 1) близки к составу верхней континентальной коры по С.Р. Тэйлору и др. [20]. Этим показателям соответствуют только радиогеохимические характеристики ленточных глин разреза Чаган-Узун, тогда как два других имеют весьма отличительные радиогеохимические признаки, соответствующие глубокометаморфизованным породам, которых нет на сегодняшней геологической карте, либо они соответствуют исходному материалу, известному в междуречье рек Акса и Буратов под названием лейкократовых гранитов или порфиридных гранитов главной фазы Мунгун-Тайгинского массива [18].

Более детальному, послойному изучению был подвергнут наиболее хорошо доступный и обнажённый Чаган-Узунский разрез ленточных глин ниже посёлка Бельтир (рис. 1). С палеогеографической точки зрения этот разрез подробно изучен и описан в отдельных работах [9–11, 14–16, 21].

Видимая мощность линзы ленточных глин данного разреза составляет 25 м, в пределах которой насчитывается до 2000 лент. Накопление линзы по данным абсолютного датирования относится к одной из начальных стадий деградации позднеплейстоценового оледенения. Так, абсолютные датировки углистых обломков из прослая ленточных алевритов с глубины 9,5 м составляют $25,3 \pm 0,6$ тыс. лет, а алевритов из линзы озерно-ледниковых глин с глубины 10 м – 32 ± 4 тыс. лет [15].

Для пород характерна тонкая слоистость из летних и зимних слоев. В обнажении пары темного и светлого тонов имеют различную мощность, однако их изменение снизу вверх по разрезу происходит, как правило, постепенно, что свидетельствует о формировании этих пар в различные промежутки времени. Наиболее подходящими единицами вре-

мени, объединяющими два резко отличных периода седиментации, являются сутки (день–ночь) и год (лето–зима). Как правило, темный слой соответствует летнему сезону, а светлый – зимнему.

По опубликованным данным [15] минералогический состав разреза постоянен. Основные компоненты (%): ильменит (30,50), обломки пород (19,51), эпидот (19,40), гранат (10,40), в мелких количествах 1–2 % присутствуют ильменит окисленный, амфиболы (1,75), роговая обманка (1,60), биотит (1,01). Высокие содержания ильменита и обломков пород свидетельствуют о динамичных условиях среды переноса и осадконакопления и невысокой степени сортированности отложений.

По всему сечению доступной части разреза были отобраны бороздовые пробы шириной 10 и глубиной 5 см. Длина борозды варьировала и зависела от текстурных особенностей породы и наличия каких-либо маркирующих горизонтов, прежде всего горизонтов, обогащённых органическим веществом, выделяющихся тёмным цветом. В одну такую пробу попадало по десятку различных слоёв. Всего было отобрано 24 пробы, характеризующие весь обнажающийся разрез ленточных глин (рис. 3).

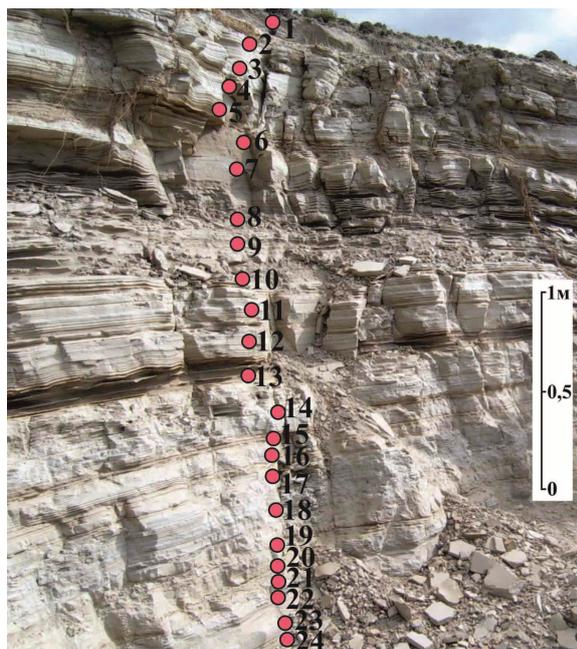


Рис. 3. Точки отprobования ленточных глин разреза Чаган-Узун

Fig. 3. Sample positions of varved clays of Chagan-Uzun section

Из всех проб, после процедур дробления, измельчения, истирания и последующего сокращения методом квартования, были отобраны навески весом около 300 мг, в которых методом инструментально-нейтронно-активационного анализа (ИНАА) было определено 25 химических элементов.

ИНАА представляет собой современный высокочувствительный, неструктивный анализ, являющийся одним из весьма эффективных методов определения редких, редкоземельных и радиоак-

тивных элементов, не требующий специфического химического разложения изучаемого материала. Облучение тепловыми нейтронами проводилось на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т Национального исследовательского Томского политехнического университета в лаборатории ядерно-геохимических методов исследования кафедры геоэкологии и геохимии (аналитики – ст. науч. сотр. А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская). Измерения производились на гамма-спектрометре фирмы «Canberra» с германий-литиевым детектором. Достоверность данного метода подтверждается результатами аттестации стандартных образцов состава, как отечественных, так и зарубежных (например, стандартный образец сравнения МАГАТЭ SD-M2/ТМ для донных осадков), и его качество является вполне удовлетворительным.

Таким образом, была получена геохимическая характеристика вскрытой части выхода ленточных глин Чаган-Узунского разреза в районе посёлка Бельтир (№ 49°59'10" E 88°12'52") в целом и её отдельных частей в частности, что и обсуждается в данной статье.

Полученные результаты и их обсуждение

Статистические параметры распределения изученных химических элементов приведены в табл. 2.

Анализ этих данных показывает, что элементы изученной толщи характеризуются крайне равномерным характером распределения, исключение составляет распределение Та, имеющий сильно дифференцированный характер. Уровень накопления изученных элементов находится в тех же пределах, что и оцениваемое их содержание в верхней части континентальной коры по С.Р. Тэйлору и др. [20], но по таким элементам, как Cr и Sb они существенно более обогащены, в 7 и в 15 раз, соответственно, что, по-видимому, является специфической геохимической особенностью изучаемого геологического блока земной коры.

Среднее содержание U, Th и такой индикаторный показатель, как величина отношения Th к U (Th/U), оценённая по среднему содержанию в 24 пробах (2,8), достаточно близки к аналогичным показателям, оценённым по полевому измерению гамма-спектрометром, соответственно: 2,9; 10,2; 3,5. Если судить по этим радиогеохимическим показателям, то область разрушения ледником пород была сложена отложениями горноалтайской серии центральной части Холзунско-Чуйского антиклинория (показатели, соответственно: 1,8; 9,5; 5,3) или Барбургазинской свиты [22] или островодужными риолитовыми порфирами [23] девона Горного Алтая (рис. 4).

Однако индивидуальная характеристика отдельных частей изученного разреза свидетельствует о том, что источники поступления химических элементов были более разнообразны, чем, например, указанные выше образования, т. к. в пределах изученной толщи есть образования с иными радиогеохимическими показателями.

Таблица 2. Статистические параметры распределения химических элементов (мг/кг) и некоторых отношений в ленточных глинах Горного Алтая**Table 2.** Statistic parameters of chemical elements distribution (mg/kg) and some ratios in varved clays in Gorny Altai

Элемент Element	$\frac{x \pm \delta}{\min - \max}$	V, %	ВКК/UCC	Кк/Сс
Na, %	$\frac{1,4 \pm 0,05}{0,86..2}$	21	2,9 %	0,5
Ca, %	$\frac{1,9 \pm 0,06}{1,3..2,5}$	16	3 %	0,6
Fe, %	$\frac{4,4 \pm 0,1}{3,3..5,6}$	16	3,5 %	1,3
Sc	$\frac{16,3 \pm 0,6}{11,9..21,5}$	17	11	1,5
Cr	$\frac{108,4 \pm 6,04}{14,1..159,1}$	28	35	7,0
Co	$\frac{18,7 \pm 0,9}{12,3..28,8}$	25	10	1,9
Rb	$\frac{94,1 \pm 5,03}{58..141}$	27	112	0,8
Sb	$\frac{3 \pm 0,2}{0,1..4,8}$	33	0,2	15
Cs	$\frac{6,9 \pm 0,4}{4,2..11}$	29	3,7	1,9
Ba	$\frac{868,5 \pm 39,9}{425..1223}$	22	50	1,6
Hf	$\frac{5,3 \pm 0,1}{4,1..6,8}$	13	5,8	0,9
Ta	$\frac{1,5 \pm 0,4}{0,25..10,7}$	133	2,2	0,7
La	$\frac{32,2 \pm 1,1}{12,9..40,9}$	17	30	1,1
Ce	$\frac{68,6 \pm 1,6}{50,1..84,1}$	11	64	1,1
Sm	$\frac{8 \pm 0,4}{5,2..11,7}$	23	4,5	1,8
Eu	$\frac{1,5 \pm 0,05}{1,1..2,1}$	20	0,9	1,7
Tb	$\frac{1,1 \pm 0,04}{0,76..1,6}$	18	0,6	1,8
Yb	$\frac{3,3 \pm 0,09}{2,3..4,1}$	12	2,2	1,5
Lu	$\frac{0,4 \pm 0,01}{0,31..0,56}$	13	0,32	1,3
Th	$\frac{8,6 \pm 0,2}{6,1..10}$	12	10,7	0,8
U	$\frac{3,2 \pm 0,2}{0,5..5,3}$	31	2,8	1,1
Th/U	2,7	0,7	3,9	0,7
La/Yb	9,7	0,5	19,1	0,5
La/Th	3,7	1,3	2,8	1,3

Примечание: x – среднее арифметическое; δ – стандартная ошибка; \min – минимальное значение; \max – максимальное значение; V – коэффициент вариации; ВКК – Кларк верхней континентальной коры [20]; Кк – коэффициент накопления относительно Кларка земной коры в целом [20]; содержание Au, Ag, As и Sr ниже предела их определения методом ИНАА.

Note: x is the arithmetic mean; δ is the standard error; \min is the minimum value; \max is the maximum value; V is the variation factor; UCC is the Clark of the upper continental crust [20]; Кк is the accrual rate relative to the Clark of Earth crust as the whole [20]; content of Au, Ag, As and Sr is lower than their determination limit by the instrumental neutron activation analysis (INAA) method.

Анализ матрицы множественной корреляции (рис. 5) показывает, что наиболее сильная положительная связь наблюдается между Sc и Fe (0,9). Значимые корреляционные связи фиксируются у Cs с Co, Fe, Rb (0,8); Sc с Rb (0,8); Fe с Rb (0,8), Lu, Cr (0,7), Th (0,8); Th с Lu, Yb, Ce (0,8), Yb с Lu (0,7).

Наличие многочисленных значимых и достоверных связей элементов с Fe косвенно подтверждает, что минералом-носителем этих элементов является ильменит, по-видимому, также слюда и циркон (значимая связь Th с редкими землями).

В табл. 3 представлена обобщающая геохимическая модель и возможные источники поступления химических элементов.

Таблица 3. Предполагаемый геохимический состав пород области переработки ледником**Table 3.** Conjectural geochemical structure of the rocks in the area of glacier processing

Горизонты ленточных глин Varved clay horizons	Блоки пород основного-среднего состава Blocks of rocks of the main and average composition	Блоки пород кислого-щелочного состава Blocks of rocks of acid-alkali composition	Радио-геохимическая специализация горизонта опробования Radio-geochemical specialization of testing horizon	Th/U	La/Yb	La/Th
1			U	2,1	8,5	3,7
2	Fe, Sc, Cr, Co		Th	19,4	8,3	3,1
3			Th	3,2	8,4	3,5
4				3,7	9,2	3,9
5			U	2,4	9,4	3,9
6				2,7	10,8	3,9
7				2,4	9,6	3,6
8	Fe, Sc, Cr, Co		min Th	2,3	10,6	4,0
9			Th, U	1,7	9,4	3,8
10			Ta	2,1	10,2	4,0
11				2,3	9,8	3,5
12				2,3	9,0	4,3
13				4,0	9,5	3,6
14				2,4	3,9	1,5
15	Fe, Sc, Cr, Co			4,5	10,0	3,5
16				3,7	12,5	3,9
17		Ce, La, Eu, Sm, Yb, Lu, Cs, Ba	Th	3,5	10,0	4,1
18				3,7	9,9	3,9
19				2,7	9,5	3,9
20			Th, U	2,0	11	3,9
21				2,4	12,1	4,2
22			U	2,2	10,9	4,2
23		Hf, Ba, Rb, La, Sm	U	2,6	10,4	4,2
24				2,1	10,4	4,6
Среднее для ленточных глин Average for varved clays				2,7	9,7	3,7

Примечание: выделены показатели выше Кларка для континентальной земной коры.

Note: the values which are higher than Clark for continental crust are highlighted in bold.

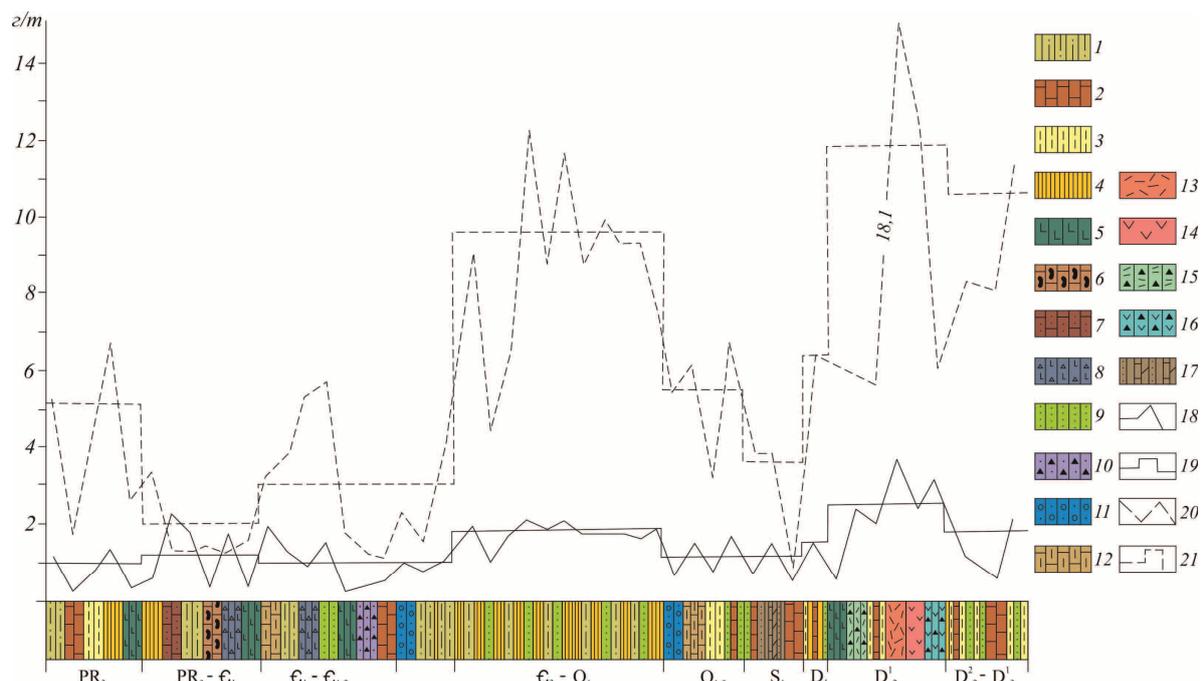


Рис. 4. Распределение средних содержаний урана и тория в верхнерифейских и палеозойских отложениях Горного Алтая и Западного Саяна [22]: 1 – кварц-альбит-серицит-эпидотовые сланцы; 2 – мраморы, известняки; 3 – кварц-альбит-эпидот-хлорит-актинолитовые сланцы; 4 – кварц-альбит-серицит-хлоритовые и глинистые сланцы; 5 – альбит-эпидот-актинолитовые сланцы (метабазиты) и уралитизированные диабазовые порфириды; 6 – кремнистые известняки, силицилиты; 7 – кристаллические известняки с органикой; 8 – туфы диабазовых порфиридов; 9 – хлоритизированные песчаники; 10 – граувакки; 11 – конгломераты, гравелиты; 12 – известняки и известково-глинистые сланцы с органикой; 13 – риолитовые порфиры; 14 – андезитовые порфириды; 15 – туфы риолитовых порфиритов; 16 – туфы андезитовых порфиритов; 17 – пелитоморфные известняки, известковистые песчаники и сланцы; 18 – содержание урана в различных типах горных пород; 19 – средние содержания урана в породах свит и серий; 20 – содержания тория в различных типах горных пород; 21 – средние содержания тория в породах свит и серий

Fig. 4. Distribution of average grades of uranium and thorium in Upper Riphean and Paleozoic deposits of Gorny Altai and western Sayan [22]: 1 – quartz-albite-sericite-epidote shales; 2 – marbles, limestones; 3 – quartz-albite-epidote-chlorite-actinolitic shales; 4 – quartz-albite-sericite-chlorite and clay shales; 5 – albite-epidote-actinolitic shales (metabasites) and uralitized diabase porphyrite; 6 – siliceous limestone, silicilytes; 7 – crystalline limestone with organic matter; 8 – tuff of diabase porphyrites; 9 – chloritized sandstones; 10 – graywacke; 11 – conglomerates, gritstones; 12 – limestones and lime shales with organic matter; 13 – rhyolite porphyry; 14 – andesite porphyrites; 15 – tuffs of rhyolite porphyry; 16 – tuffs of andesite porphyrites; 17 – pelitomorphic limestones, calcareous sandstones and shales; 18 – uranium content in different types of rocks; 19 – uranium average contents in rocks of strata and series; 20 – thorium content in different types of rocks; 21 – thorium average contents in rocks of strata and series

Для получения обобщающих показателей и общей картины распределения элементов были построены геохимические разрезы и рассчитаны отношения по некоторым элементам, таким как Th, U, La, Yb.

В целом по разрезу можно выделить, в первом приближении, цикличность в распределении ряда элементов. Так, в слоях 1–5 идет повышение содержания Th и U, тогда как в 5–10 слоях идет их понижение, а в 11–16 вновь наблюдается увеличение с последующим понижением к точкам 17–19 и обратно повышение их содержания в 20–24 точках. В первом приближении можно выделить три максимума накопления Th: 1) точки 2 и 3, 2) точка 9, 3) точка 17; и два минимума его концентрирования: 1) точки 12 и 13, 2) точка 8 (рис. 6).

По величине Th/U в разрезе выделяется по два максимума ($Th/U > 3$), приходящихся на точки

опробования 2–4 и на точки 15–18 (рис. 7). Следует также отметить, что точки 7–9 имеют пониженные значения Th/U (до 1,7 в точке 9). Небезынтересно, что все они располагаются в пачке интенсивно послойно перемежаемых ленточных глин. Повышенные показатели Th/U фиксируются ниже хорошо выраженного маркера в ленточных глинах в виде горизонта темной, до черной, окраски (точка опробования 13). Соответственно, существует два интервала с наименьшей величиной этого показателя: точки 5–14 и 20–24. Намечается третий интервал минимального Th/U в самой верхней части разреза, но он представлен только одной точкой. При этом значения этого показателя в точке 2 весьма высокие и составляют 19,4, что почти в 7 раз выше усредненного его показателя для всей изученной толщи и в 5 раз выше этого показателя для верхней части континентальной коры (3,9).

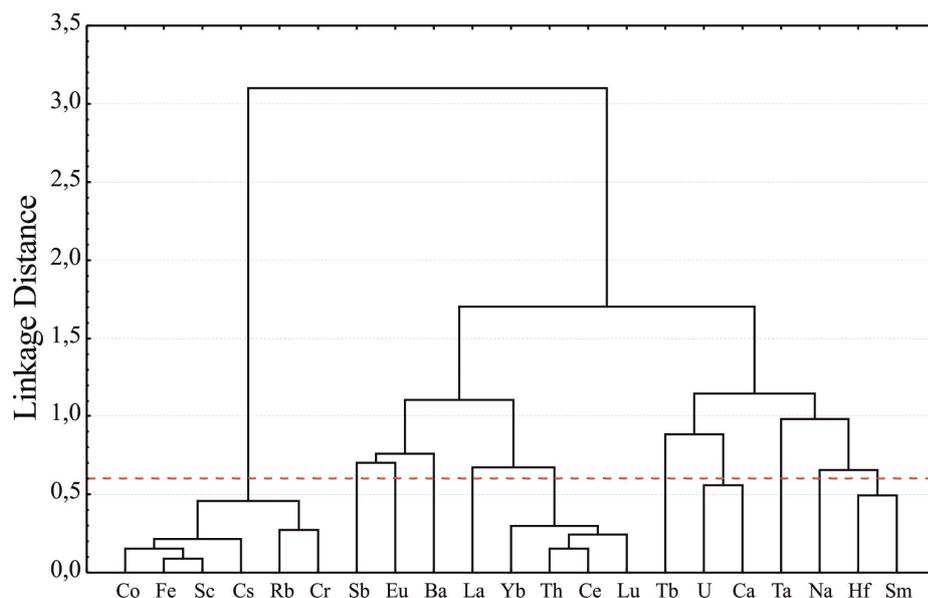


Рис. 5. Дендрограмма (Ward's метод) корреляционной матрицы геохимического спектра ленточных глин Горного Алтая (1-Person $r_{0,05}=0,60$; $N=24$)

Fig. 5. Dendrogram (Ward's method) of correlation matrix of geochemical spectrum in varved clays of Gorny Altai (1-Person $r_{0,05}=0,60$; $N=24$)

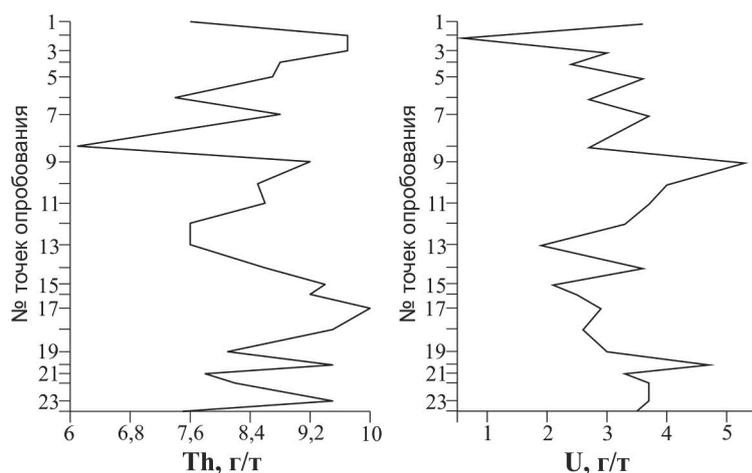


Рис. 6. Характер распределения тория и урана в вертикальном профиле ленточных глин разреза Чаган-Узун

Fig. 6. Pattern of thorium and uranium distribution in verticle profile of varved clays in Chang-Uzun section

На сегодняшний день среди осадочно-метаморфических образований Горного Алтая породы с такими радиогеохимическими показателями неизвестны [22].

Следует также отметить, что ниже интервала с пониженными значениями Th/U (точки 5–12) залегают породы с более высоким лантан-иттербиевым отношением (La/Yb). При этом между двумя слоями, обогащенными углеродистым веществом, залегает горизонт ленточных глин с минимальным показателем 3,9 (рис. 7, точка 14). Лантан-ториевое отношение (La/Th) в этой точке (1,5) минимально и почти в два раза ниже значения для осадочных пород мира ($2,8 \pm 0,2$).

В распределении хорошо коррелируемых между собой элементов группы сидерофилов (Fe, Cr, Sc, Co) в первом приближении также выделяются три максимума (точки 2 и 3, 9, 15 и 16) и два минимума их накопления (точки 4–9, 11 и 12, 17) (рис. 8). Наличие трех горизонтов с максимальным накоплением этих элементов может служить доказательством того, что в это время ледником перерабатывался блок пород основного состава, являющихся поставщиком ильменита в горизонты формирующихся ленточных глин. Общеизвестно, что именно ильменит является концентратором элементов сидерофильной группы.

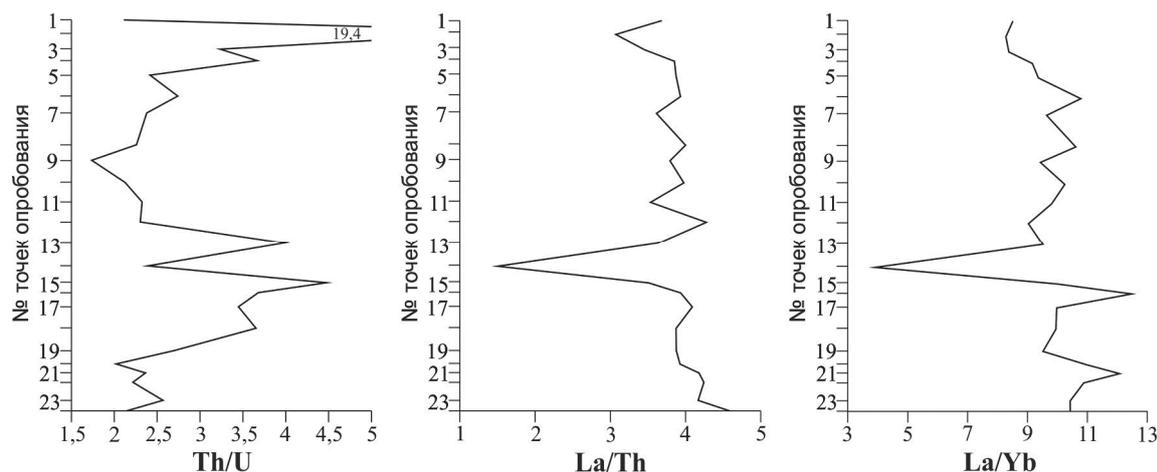


Рис. 7. Характер изменения некоторых отношений элементов в вертикальном профиле ленточных глин разреза Чаган-Узун

Fig. 7. Elements interaction behavior in vertical profile of varved clays in Chang-Uzun section

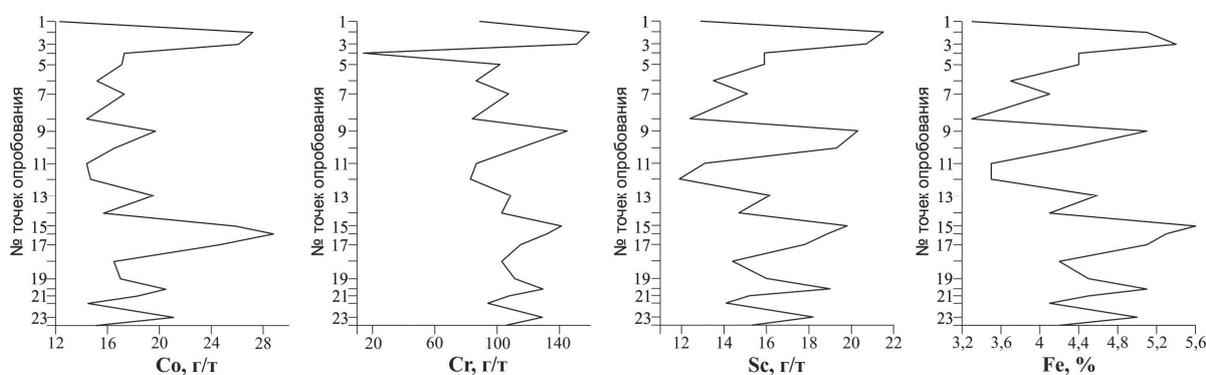


Рис. 8. Характер распределения элементов группы сидерофилов в вертикальном профиле ленточных глин разреза Чаган-Узун

Fig. 8. Distribution of elements of siderophile group in vertical profile of varved clays in Chang-Uzun section

Группа геохимически связанных между собой редкоземельных элементов также имеет близкие кривые вертикального распределения (рис. 9). При этом фиксируется либо два (Eu, Tb), либо три минимума их накопления (Ce, Yb, Lu) и соответственно два или три максимума их накопления: 1) точки 3 и 4, 2) точка 17.

Наиболее ярким горизонтом осадочных пород с максимальным накоплением элементов группы редких земель является горизонт, представленный в точке 17. В ней происходит практически самое максимальное концентрирование редких земель (La, Ce, Sm, Yb, Lu), в этом же горизонте происходит накопление и ряда щелочных и щелочноземельных элементов (Cs, Ba), а также Th. Все это в совокупности позволяет предполагать, что ленточные глины, залегающие на уровне точки опробования 17, формировались при участии пород типа гранитов-сиенитов, либо кислых вулканитов девонского возраста, геохимический спектр которых больше всего подходит к составу ленточных глин.

Близкая к этому, но менее контрастная по геохимическому составу, была обстановка на уровне точек опробования 2, 3 и 9, 10. При этом во время

формирования озерных отложений на уровне точки опробования 10 ледник перерабатывал горную породу с повышенным содержанием Ta и минимально низкой концентрацией Sb.

В.В. Бутвиловский [14], изучавший данный разрез ленточных глин, отмечает, что в химическом составе глинистых слоев отражается процесс накопления карбоната кальция, фосфатных соединений, натрия и кремния. По этим показателям, судя по представленным в его работе материалам, может быть выделено в первом приближении три ритма осадконакопления, что находит отражение и в наших геохимических данных.

Выявленная геохимическая цикличность в ленточных глинах разреза Чаган-Узун определяется не только неоднородным составом переработанных пород цоколя, но и режимом ледниковой деятельности, динамикой стока ледниковых вод и рядом других параметров.

В соответствии с орографическими особенностями бассейна питания ледники не одинаково изменяют свои размеры при общих флуктуациях климатических условий или, иначе, при общих региональных изменениях высоты снеговой линии.

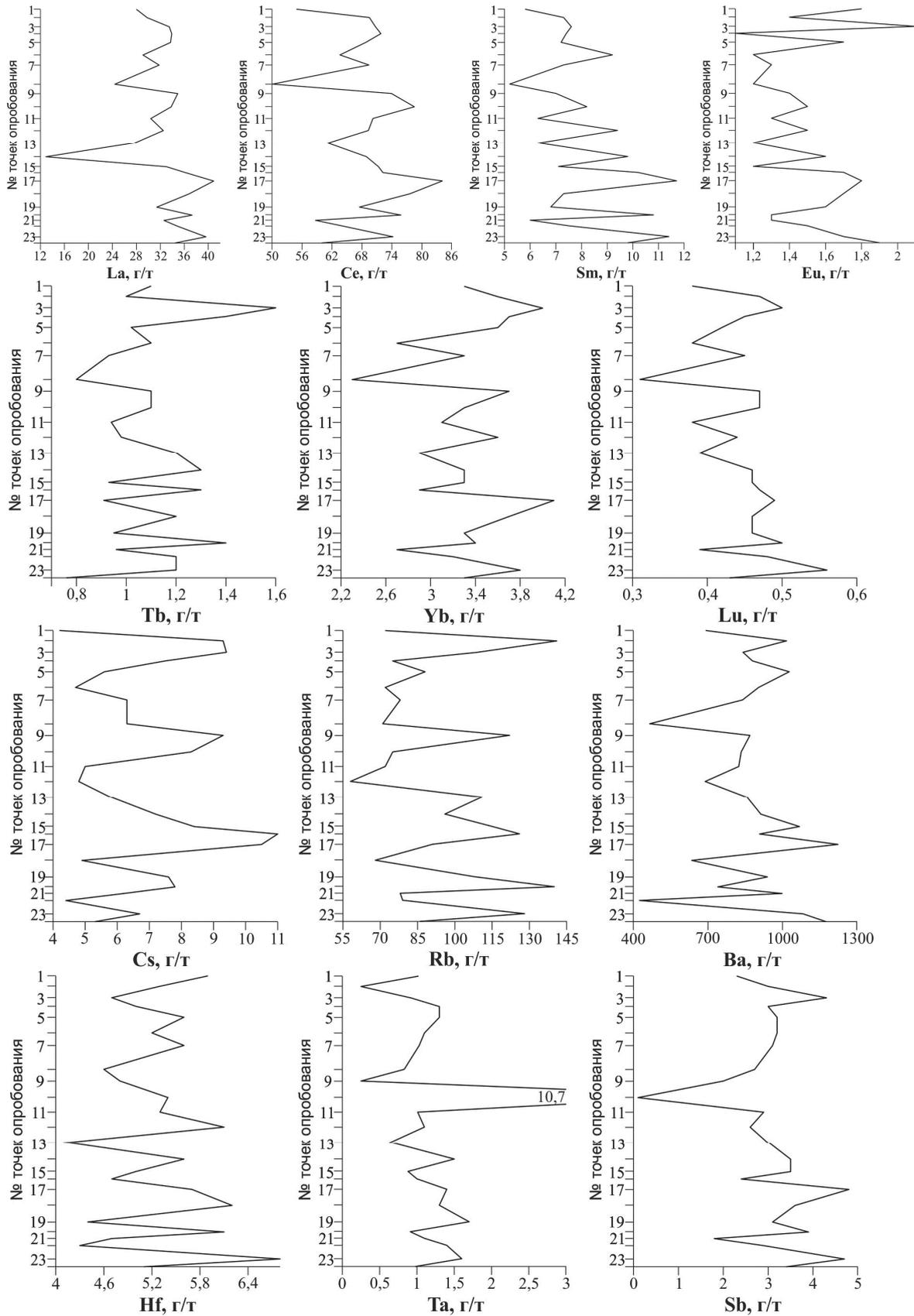


Рис. 9. Характер распределения редкоземельных и радиоактивных элементов в вертикальном профиле ленточных глин разреза Чаган-Узун

Fig. 9. Distribution of rare-earth and radioactive elements in vertical profile of varved clays in Chang-Uzun section

При сложном геологическом строении бассейна Чаган-Узуна в результате динамики размеров ледников эрозии подвергались разные геологические комплексы [24]. При максимальном развитии оледенения в формировании спектра химических элементов участвовали горные породы всего бассейна. По мере деградации этого сложного ледника выключались из зоны активной экзарации бассейны нижних боковых ледниковых притоков, в частности бассейн р. Кыскынон, затем бассейн р. Джелло (оба на восточном макросклоне Северо-Чуйского хребта). Далее ослабевало значение эрозионного процесса других боковых ледников, да и в основных долинах на интенсивности донной эрозии сказывались стадийные изменения ледников.

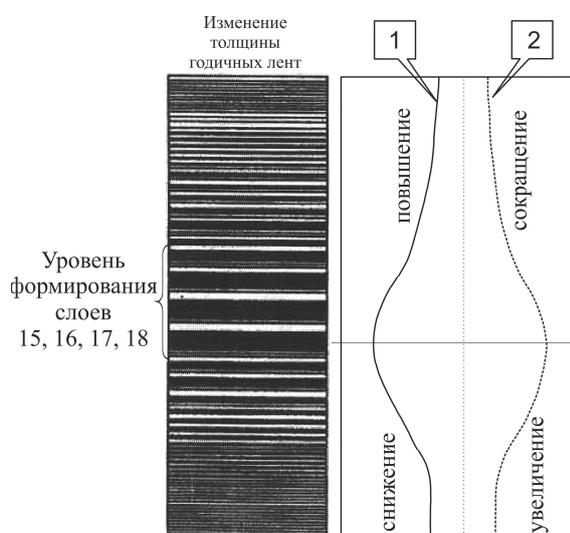


Рис. 10. Схема интерпретации изменения толщины годичных лент в колебаниях уровней и расходов воды Чуйско-Курайской лимносистемы (по П.С. Бородавко, [21]): 1 – динамика уровня лимносистемы; 2 – динамика расходов воды

Fig. 10. Scheme of interpretation of varve thickness change in fluctuation of water levels and rates in Chuya-Kuray limnosystem (by P.S. Borodavko [21]): 1 is the dynamic of limnosystem level; 2 is the dynamic of water rate

Подобную реакцию на колебания климата испытывали и ледники, образывавшие в позднем неоплейстоцене преграду (плотину) для стока вод из Чуйско-Курайской межгорной котловинной системы. Но их роль в динамике глубины ледниково-подпрудного озера была прямо противоположной: отступающие ледники в долинах увеличивали жидкий сток в озёрный бассейн, а одновременно ослабевавшая плотина способствовала увеличению стока из этого озера. Что и на сколько превалировало в этой системе – сказать невозможно. Но факт колебаний глубины озера зафиксирован в изменениях толщины годичных лент: пачки тонких лент отражают увеличение глубины и расширение границ акватории, а пачки толстых лент с закономерным изменением их толщины в пачке отражают уменьшение глубины приёмного бассейна (рис. 10).

Такие изменения в параметрах акватории осадконакопления, изменения гранулометрии осадка и площадей активной ледниковой экзарации, на наш взгляд, нашли отражение в распределении химических элементов по горизонтам вертикального профиля обнажения ленточных отложений в виде аномальных концентраций ряда изученных элементов в точках опробования 15–18.

Выводы

Геохимические особенности ленточных глин Горного Алтая по своим характеристикам близки к составу верхней континентальной коры. Содержание редких земель, а особенно Cr и Sb, превышает их средние оценки в континентальной коре, что является спецификой данного региона.

Индикаторные отношения (Th/U, La/Yb) в изученных ленточных глинах несколько ниже этих показателей для верхней части континентальной коры, но по показателю La/Th они значительно отличаются от таковых, характерных для тонкозернистых осадочных пород континентальной коры (2,8), что свидетельствует о специфике их формирования.

Среди геохимических ассоциаций весьма четко выделяется две группы элементов: Fe, Co, Sc и Ta, Hf, Sm.

Изучение геохимических особенностей ленточных глин Алтая, на примере их выхода в районе пос. Бельтир (разрез Чаган-Узун), показывает, что отложения приледниковых озер формировались в разные временные интервалы за счет истирания разного типа горных пород: базальтоидов и габброидов, гранитов, сиенитов и липаритов, а также метаморфических сланцев. При этом, судя по геохимическим данным, как минимум трижды питание терригенным материалом осуществлялось за счет истирания пород фемического состава (точки 2, 3, 8, 15, 16), и дважды это происходило за счет сиалических пород (точки 17, 23).

В вертикальном распределении изученных химических элементов отмечаются закономерные тенденции сверху вниз по разрезу в виде увеличения общего содержания U, Sm, Eu и некоторых других. Специфическим событийным интервалом в изученном разрезе ленточных глин является уровень, соответствующий точкам 15–18, характеризующийся максимальным накоплением элементов. Этот интервал соответствует времени смены увеличения глубины водоема и расширения границ акватории с уменьшением глубины лимносистемы, что свидетельствует о значительной роли в формировании геохимических особенностей ленточных глин динамики ледниковой деятельности и режима формировавшейся при этом лимносистемы.

Геохимическое исследование осадков, образующихся флювиогляциальных комплексов, может служить одним из вспомогательных критериев при их изучении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горная энциклопедия: в 5 т. / под ред. Е.А. Козловского. – М.: Советская энциклопедия, 1984–1991. – Т. 3: Кенган – Орт. – 1987. – 592 с.
2. Uchman A., Kazakauskas V., Gaigalas A. Trace fossils from Late Pleistocene varved lacustrine sediments in eastern Lithuania // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2009. – V. 272. – P. 199–211.
3. Gedl P. Palynology of Late Pleistocene varved clays from ice-dammed lakes at Leborg and Zlocieniec (north-western Poland) – preliminary results // *Geologos*. – 2011. – № 17 (1). – P. 49–59.
4. Johnson M., Stahl Y. Stratigraphy, sedimentology, age and paleoenvironment of marine varved clay in the middle Swedish endmoraine zone // *Boreas*. – 2010. – V. 39. – № 2. – P. 199–214.
5. An event stratigraphy for the last glacial-holocene transition in eastern middle Sweden: results from investigations of varved clay and terrestrial sequences / J. Bjoerck, S. Wastegard, K. Schoning, T. Andren, G. Possnert // *Quaternary Science Reviews*. – 2002. – V. 21. – № 12–13. – P. 1489–1501.
6. Zillen L. Setting the holocene clock using varved lake sediments in Sweden // *Lundqua Thesis*. – 2003. – V. 50. – P. 1–37.
7. De Geer G.A. Geochronology of the last 12000 years // 11th *Congres Geologique Internationale, Comptes Rendues*. – Stockholm, 1912. – P. 241–253.
8. Бахмутов В.Г., Евзеров В.Я., Колька В.В. Литология и палеомагнетизм ленточных глин // *Сборник научных трудов Института геологических наук НАН Украины*. – 2008. – № 6. – С. 55–66.
9. Окишев П.А., Рудой А.Н., Герасимов Н.Г. Ленточные отложения Чаган-Узуна и их палеогляциологическое значение // *Гляциология Алтая*. – Томск: Томский университет, 1978. – Вып. 14. – С. 43–65.
10. Рудой А.Н. К диагностике годичных лент в озёрно-ледниковых отложениях Горного Алтая // *Известия Всесоюз. географического общ.* – 1981. – Т. 113. – Вып. 4. – С. 334–339.
11. Рудой А.Н. Некоторые вопросы палеогеографической интерпретации литологии и особенностей распространения озёрно-ледниковых отложений Горного Алтая // *Гляциология Сибири*. – 1981. – Вып. 1 (16). – С. 111–134.
12. Гольдшмидт В.М. Геохимия // *Сборник статей по геохимии редких элементов (перевод с немецкого и английского)*. – М.: Л., 1938. – 244 с.
13. Максимов Е.В., Данилов В.С., Михайлова Т.В. Стадии распада горных ледников последнего оледенения и радиоактивность // *Известия Всесоюз. географического общества*. – 1990. – Т. 122. – Вып. 6. – С. 529–535.
14. Бутвиловский В.В. Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993. – 253 с.
15. Разрез новейших отложений Алтая (Опорные разрезы новейших отложений) / под ред. К.К. Маркова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. – 208 с.
16. Зольников И.Д., Мистрюков А.А. Четвертичные отложения и рельеф долин Чуи и Катунь. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 182 с.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Каталог ледников СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Горный Алтай и Верхний Иртыш. Ч. 6. Бассейн р. Чуи. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 60 с.
18. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований (на примере Алтае-Саянской складчатой области). – Новосибирск: Изд-во «Гео» СО РАН, 2002. – 535 с.
19. Митропольский А.С. Уран и торий в процессах развития земной коры юга Алтае-Саянской складчатой области: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 1978. – 48 с.
20. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: её состав и эволюция. Рассмотрение геохимической летописи, запечатлённой в осадочных породах. – М.: Изд-во «Мир», 1988. – 384 с.
21. Бородавко П.С. Эволюция Чуйско-Курайской лимносистемы в позднем неоплейстоцене: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Томск, 2003. – 22 с.
22. Уран и торий в геосинклинальных отложениях Горного Алтая и Западного Саяна / под ред. А.С. Митропольского. – Новосибирск: Наука, 1975. – 90 с.
23. Тихунов Ю.В. Геохимия девонских вулканитов островодужного типа центральной и западной частей Горного Алтая. Препринт № 2. – Новосибирск: ОИГГМ, 1994. – 54 с.
24. Карта полезных ископаемых. Серия Горно-Алтайская. М-45-XVI. М: 1:200000. – 1961.

Поступила 11.09.2014 г.

UDC 551.332:550.4(571.151-25)

GEOCHEMICAL FEATURES OF VARVED CLAYS IN GORNY ALTAI AND THEIR POTENTIAL USE IN GLACIOLOGICAL STUDIES

Leonid P. Rikhvanov,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

Peter A. Okishev,

Dr. Sc., National Research Tomsk State University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: tourism2011@vtomske.ru

Nadezhda P. Soboleva,

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: sobnadi@yandex.ru

Elnar I. Mataev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: mataevelnar@mail.ru

The relevance of the research is caused by the insufficient knowledge of the varved clays glacial lakes of the Gorny Altai from the geochemical point of view and the possibility of modern data application for reconstructing the dynamics of glacial activity on the observed area.

The main aim of the study is to estimate the content of 25 chemical elements including rare, rare-earth and radioactive elements; to analyze their distribution nature in the section of varved clays and to compare the periodicity of elements accumulation in section with the potential sources of rock destruction products from surrounding glaciers.

The methods used in the study: gamma-spectrometric method, the method of instrumental neutron activation analysis, analysis of multiple correlation matrix by the Ward's method; statistical analysis, the comparative geographical method.

The results. The author has obtained the parameters of 25 chemical elements distribution based on instrumental neutron activation analysis results. The parameters reflect the nature and characteristics of their accumulation in the vertical profile of the varved clays formed in the ancient glacial lake. General trend of chemical elements behavior in varved clays formation was determined. The author defined the accumulation cycles of U, Th, rare-earth elements and their relationships and identified the geochemical elements associations in the section. The formation of geochemical features of Altai varved clays depends on glacial activities dynamics and the mode of glacial lakes. Geochemical study of varved clays glaciofluvial complexes can be used as one of the adjunct criteria in their investigation and for reconstruction of the past glacial situation.

Key words:

Varved clays, Gorny Altai, glaciers, glacial reconstruction, geochemical features, radionuclides, rare-earth elements.

REFERENCES

1. *Gornaya enciklopediya* [Mountain Encyclopedia]. Ed. by E.A. Kozlovsky. Moscow, Soviet Encyclopedia Publ., 1984–1991. Vol. 3. Kengan – Ort, 1987. 592 p.
2. Uchman A., Kazakauskas V., Gaigalas A. Trace fossils from Late Pleistocene varved lacustrine sediments in eastern Lithuania. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, vol. 272, pp. 199–211.
3. Gedl P. Palynology of Late Pleistocene varved clays from ice-dammed lakes at Leborg and Zlocieniec (north-western Poland) – preliminary results. *Geologos*, 2011, no. 17 (1), pp. 49–59.
4. Johnson M., Stahl Y. Stratigraphy, sedimentology, age and paleoenvironment of marine varved clay in the middle Swedish end-moraine zone. *Boreas*, 2010, vol. 39, no. 2, pp. 199–214.
5. Björck J., Wastegård S., Schoning K., Andren T., Possnert G. An event stratigraphy for the last glacial-holocene transition in eastern middle Sweden: results from investigations of varved clay and terrestrial sequences. *Quaternary Science Reviews*, 2002, vol. 21, no. 12–13, pp. 1489–1501.
6. Zillen L. Setting the holocene clock using varved lake sediments in Sweden. *Lundqua Thesis*, 2003, vol. 50, pp. 1–37.
7. De Geer G.A. Geochronology of the last 12000 years. *11th Congress Geologique Internationale, Comptes Rendues. – Stockholm, 1912*. pp. 241–253.
8. Bakhmutov V.G., Evzerov V.Ya., Kolka V.V. Litologiya i paleomagnetizm lentochnykh glin [Lithology and paleomagnetism of varved clays]. *Sbornik nauchnykh trudov Instituta geologicheskikh nauk NAN Ukrainy*, 2008, no. 6, pp. 55–66.
9. Okishev P.A., Rudoy A.N., Gerasimov N.G. Lentochnye otlozheniya Chagan-Uzuna i ikh paleoglyatsiologicheskoe znachenie [Varved sediments of Chagan-Uzun and their Paleoglaciology meaning]. *Glyatsiologiya Altaya*, 1978, Iss. 14, pp. 43–65.
10. Rudoy A.N. K diagnostike godichnykh lent v ozerno-lednikovyykh otlozheniyakh Gornogo Altaya [To diagnose the annual varved lake-glacial sediments of the Gorny Altai]. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, 1981, vol. 113, Iss. 4, pp. 334–339.
11. Rudoy A.N. Nekotorye voprosy paleogeograficheskoy interpretatsii litologii i osobennostey rasprostraneniya ozerno-lednikovyykh otlozheniy Gornogo Altaya [Some issues of paleogeographic interpretation of lithology and propagation features of the lake-glacial sediments in Gorny Altai]. *Glyatsiologiya Sibiri*, 1981, Iss. 1 (16), pp. 111–134.

12. Goldshmidt V.M. Geokhimiya [Geochemistry]. *Sbornik statey po geokhimii redkikh elementov* [Articles collection of the rare elements geochemistry]. Moscow; Leningrad, 1938. 244 p.
13. Maksimov E.V., Danilov V.S., Mikhaylova T.V. Stadii raspada gornyykh lednikov poslednego oledeneniya i radioaktivnost [The decay stage of the mountain glaciers of the last glaciation and the radioactivity]. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, 1990, vol. 122, Iss. 6, pp. 529–535.
14. Butvilovskiy V.V. *Paleogeografiya poslednego oledeneniya i golotsena Altaya: sobytiyno-katastroficheskaya model* [Paleogeography of the last glaciation and the Holocene of Altai: an event-catastrophic model]. Tomsk, TSU Publ., 1993. 253 p.
15. *Razrez noveyshikh otlozheniy Altaya (Opornye razrezy noveyshikh otlozheniy)* [Section of the latest sediments of Altai (reference sections of the latest sediments)]. Ed. by K.K. Markov. Moscow, MSU Publ., 1977. 208 p.
16. Zolnikov I.D., Mistryukov A.A. *Chetvertichnye otlozheniya i relief dolin Chui i Katuni* [Quaternary sediments and relief of Chui and Katun valleys]. Novosibirsk, Parallel Publ., 2008. 182 p.
17. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Katalog lednikov SSSR. Tom 15. Altay i Zapadnaya Sibir. Vypusk 1. Gornyy Altay i Verkhniy Irtysh. Chast 6. Basseyn Chui* [The surface water resources of the USSR. The catalogue of glaciers of the USSR. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 1. Gorny Altai and Upper Irtysh. P. 6. Chuya river basin]. Leningrad, Gidrometeo Publ., 1974. 60 p.
18. Rikhvanov L.P. *Radiogeokhimicheskaya tipizatsiya rudno-magmaticheskikh obrazovaniy (na primere Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti)* [Radiogeochemical typification of ore-magmatic formations (by the example of the Altai-Sayan folded area)]. Novosibirsk, «Geo» SB RA Publ., 2002. 535 p.
19. Mitropolskiy A.S. *Uran i toriy v protsessakh razvitiya zemnoy kory yuga Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk* [Uranium and thorium in the processes of the Earth crust development of the south Altai-Sayan folded area. Dr. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 1978. 48 p.
20. Teylor S.R., Mak-Lenman S.M. *Kontinentalnaya kora: ee sostav i evolyutsiya. Rassmotrenie geokhimicheskoy letopisi, zapechatlennoy v osadochnykh porodakh* [Continental crust: its composition and evolution. Consideration of the geochemical chronicle, imprinted in the sedimentary rocks.]. Moscow, Mir Publ., 1988. 384 p.
21. Borodavko P.S. *Evolutsiya Chuysko-Kurayskoy limnosistemy v pozdnem neopleystotsene. Avtoreferat Dis. Kand. nauk* [Evolution of the Chuya-Kuray limnosistem in the Late Pleistocene. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2003. 22 p.
22. *Uran i toriy v geosinklinalnykh otlozheniyakh Gornogo Altaya i Zapadnogo Sayana* [Uranium and thorium in the geosynclinal sediments of the Gorny Altai and the Western Sayan]. Ed. by A.S. Mitropolskiy. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975. 90 p.
23. Tikunov Yu.V. *Geokhimiya devonskikh vulkanitov ostrovo-duzhnogo tipa tsentralnoy i zapadnoy chastey Gornogo Altaya* [Geochemistry of the Devonian volcanic rocks of the festoon islands type in the central and western parts of the Gorny Altai]. Novosibirsk, OIGGM, 1994. 54 p.
24. *Karta poleznykh iskopaemykh. Seriya Gorno-Altayskaya. M-45-XVI. M: 1:200000* [Map of mineral deposits. Gorny Altai series. M-45-XVI. Scale 1:200000]. 1961.

Received: 11 September 2014.

УДК 552.3:550.4:550.42:550.93

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ГЕОХИМИИ И ПЕТРОЛОГИИ ТОПОЛЬНИНСКОГО ГАББРО-ГРАНОДИОРИТ-ГРАНИТОВОГО КОМПЛЕКСА ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев Анатолий Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор каф. географии и экологии естественно-географического факультета ФГБОУ «Алтайская государственная академия образования им. В.М. Шукшина», Россия, 659333, г. Бийск, ул. Советская, д. 11. E-mail: anzerg@mail.ru

Коробейников Александр Феопенович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор каф. геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lev@tpu.ru

Гусев Николай Иванович,

канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом Восточной Сибири Всероссийского геологического института им. А.П. Карпинского, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Средний пр., 74. E-mail: nikolay_gusev@vsegei.ru

Кукоева Мария Александровна,

аспирант каф. географии и экологии естественно-географического факультета ФГБОУ «Алтайская государственная академия образования им. В.М. Шукшина», Россия, 659333, г. Бийск, ул. Советская, д. 11. E-mail: kukoeva@mail.ru

Актуальность работы определяется необходимостью изучения петро-геохимических и петрологических особенностей габбро-гранитоидных комплексов, с которыми связано золото-медно-скарновое оруденение.

Цель работы: изучение геохимии породных типов топольнинского комплекса Горного Алтая с использованием канонических классификационных и экспериментальных диаграмм по генезису и петрологии магматитов.

Методы исследования. Химический состав на главные петрогенные элементы определён силикатным анализом. Определения редких элементов выполнены эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре «ОПТИМА-4300», для Cu, Zn, Pb, Li – методом ISP-AES, остальные элементы, в том числе PЗЭ, – методом ISP-MS в лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Абсолютный возраст гранитоидов определён U-Pb методом SHRIMP II по циркону в лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

Результаты. Уточнён абсолютный возраст формирования гранитоидов топольнинского комплекса, составивший для Топольнинского массива по 10 точкам $397,4 \pm 4,4$ млн лет, Караминского массива: $399,3 \pm 4,6$ млн лет, соответствующие границе нижне-го и среднего девона. Описана прямая зональность в строении Караминского массива, в котором более эволюционированные фазы лейкогранитов располагаются в центре массива, а ранние габброиды – на периферии. Оценены различные петрохимические коэффициенты, индексы, модули для пород комплекса, используемые для расшифровки генезиса. Соотношения изотопов стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для гранодиоритов Топольнинского массива – 0,70556, а для Караминских лейкогранитов – 0,70618) свидетельствуют о мантийной природе расплавов, формировавшихся с участием контаминации корового материала. Указана пространственная и парагенетическая связь различных типов оруденения с гранитоидами топольнинского комплекса.

Ключевые слова:

Гранитоиды, комплекс, абсолютный возраст, зональный массив, петрохимия, мантийно-коровое взаимодействие, оруденение, изотопы стронция, золото, медь.

Введение

Топольнинский комплекс в петротипе представлен двумя массивами гранитоидов: Топольнинским и Караминским, расположенными в северо-восточном борту р. Ануй, контролирующими размещение скарнов с золотом [1]. Топольнинский массив содержит 2 фазы: биотит-роговообманковые гранодиориты (80 %) и граниты (20 %). Дайки представлены диоритами, долеритами, гранодиоритами.

Юго-восточнее расположен Караминский массив более разнообразный по составу, включающий

5 фаз (%): габбро-диориты (5), кварцевые диориты (10), гранодиориты (60), граниты (15), лейкократовые гранит-порфиры (10). Среди многочисленных даек преобладают гранодиориты и кварцевые гранит-порфиры. С гранитоидами Караминского массива пространственно связано золото-черносланцевое и золото-медно-скарновое оруденение [2].

Восточная, менее эродированная, часть Караминского массива и эндоконтактные зоны шириной 50–750 м сложены гранитоидами пестрого состава с отчетливо проявленной зональностью (по направлению к экзоконтакту): лейкогранитами –

гранитами нормального ряда – гранодиоритами – тоналитами – кварцевыми диоритами – габбро-диоритами и габброидами. При этом граниты нигде не контактируют с вмещающими породами. Ранее возраст гранитоидов топольнинского комплекса определялся средним девоном [3, 4], а на изданной геологической карте масштаба 1:200 000 – средне-позднедевонским [1] (рис. 1).

Петрографическая характеристика пород

Габбро и габбро-диориты первой фазы внедрения ограничено развиты в пределах Топольнинского рудного поля. Они образуют небольшое линзовидное тело в правом борту р. Карамы в 1 км ниже устья руч. Рыбного и дайку протяженностью около 100 м на участке Баяниха. Тело габбро-диоритов имеет ширину до 80–90 м, протяженность до 300 м, вытянуто в близмеридиональном направлении субсогласно слоистости ороговикованных вмещающих пород камышенской свиты нижнего девона. Восточный контакт интрузии и расположенная рядом дайка габбро-диорит-порфириров «срезаны» дайкой кварцевых диорит-порфириров, а средняя часть – диагонально ориентированной (св северо-западном направлении) дайкой гранит-порфириров. Контакты габбро-диоритов с вмещающими породами не наблюдались; экзоконтактовое воздействие габбро-диоритов «затушевано» ороговикованием со стороны Караминского массива. Небольшое тело габбро описано в западном контакте Караминского массива.

В неизмененных разностях габбро-диоритов первой фазы под микроскопом устанавливаются аллотриоморфнозернистая, габбро-офитовая структуры, образованные сочетанием идиоморфных табличек сосюритизированного плагиоклаза № 52–59 % (55–70 %) с реликтовым моноклинным пироксеном (иногда гиперстеном) и замещающей его роговой обманкой (25–30 %). Второстепенные минералы представлены хлоритизированным биотитом (1–3 %), вторичным амфиболом тремолит-актинолитового ряда по роговой обманке (5–10 %), кварцем (2–5 %). Минералы-акцессории (г/т): ильменит (620), сфен (53), апатит (25), пирит (452 знака).

Тоналиты и кварцевые диориты второй фазы слагают краевую эндоконтактовую полосу Караминского массива шириной 50–300 м. Контакты между тоналитами и кварцевыми диоритами постепенные, фациальные; характерны взаимопереходы между тоналитами и кварцевыми диоритами, а также и с краевыми частями гранодиоритов. Визуально это массивные зеленовато-серые среднезернистые породы, иногда с пегматоидным обликом, определяющимся по наличию крупных (до 2,5×8,0 мм) фенокристаллов роговой обманки. По составу темноцветных минералов выделяются биотит-роговообманковые (преимущественно тоналиты), роговообманковые, пироксен-роговообманковые разности (кварцевые диориты). Микроструктура пород гипидиоморфнозернистая с элементами гранитной.

Биотит-роговообманковые тоналиты второй фазы характеризуются массивной, шпировой, пятнистой текстурами. Минеральный состав: кварц 25–30 %, плагиоклаз 50–60 %, калиевый полевой шпат от 3–5 %, иногда до 10 %, биотит 3–5 %, роговая обманка от 5–10 %, иногда до 20 %, незначительное количество ильменита. Плагиоклаз образует идиоморфные серицитизированные табличчатые зерна размерами до 2–2,5 мм. Зональность отдельных зерен плагиоклаза нормальная: центральная часть (с № 38–42°) соответствует лабрадор-битовниту, периферия (с № 30–36°) – лабрадору. Калишпат в виде ксеноморфных буроватых амёбообразных обособлений иногда образует бластические сростки калиевого полевого шпата-2 вокруг зерен плагиоклаза до полного замещения последнего с образованием скелетных структур. Кварц образует неправильные по форме зерна размером до 2,0 мм с волнистым и блоковым погасанием, в более крупных зернах кварца отмечаются пойкилитовые вростки плагиоклаза. Биотит, плеохроирующий от бурого до темно-бурого цвета, представлен табличками безконцевых структур; с ним ассоциирует и в нем содержится вкрапленность рудного минерала. Буроватая и буровато-зеленая роговая обманка слагает ксеноморфные формы в интерстициях плагиоклаза, реже образует шпировые скопления и идиоморфные зерна, в которых иногда видны отчетливые двойники (с Ng=14°); содержит включения ильменита (вероятно, две генерации роговой обманки). Их средний минеральный состав (%): плагиоклаз 40×45, кварц 10×20, калиевый полевой шпат 10×15, иногда до 20, роговая обманка (преобладает над пироксеном) и пироксен 15×20. Плагиоклаз среднего (андезинового) состава (№ 38–43) образует идиоморфные кристаллы, нацело замещенные серицитом, реже – эпидотом и сосюритом. Буроватый калишпат выполняет интерстиции между зернами плагиоклаза, содержит пойкилитовые включения роговой обманки и плагиоклаза. Кварц образует ксеноморфные выделения со слабым волнистым погасанием, иногда содержит пойкилитовые включения плагиоклаза. Бурая роговая обманка слагает сильно вытянутые ромбовидные зерна с ясно выраженной спайностью и образует псевдоморфозы по пироксену. Пироксен формирует удлиненные по форме бесцветные зерна с ясно выраженной спайностью. Роговая обманка характеризуется более высокой, нежели пироксен, степенью идиоморфизма, образует сростки и гломерпорфировые скопления.

Гранодиориты – это среднезернистые, иногда порфировидные породы серой и розовато-серой окраски. По минеральному составу выделяются биотит-роговообманковые и роговообманковые гранодиориты. Наименее измененные разности характеризуются гипидиоморфнозернистой микроструктурой, в измененных разностях широко развита гранобластовая структура. Минеральный состав (%): кварц 30×35 (в лейкократовых разностях

до 45), плагиоклаз 30×50 , калишпат (ортоклаз) 15×20 , роговая обманка от 5–6, иногда до 45 в меланократовых разностях, пироксен (N_g 35–40°) 4–5, биотит 2×3 . Плагиоклаз средне-кислого состава образует таблитчатые и ксеноморфные обособления (вероятно, присутствуют две генерации плагиоклаза) со слабо выраженной зональностью, часто интенсивно серицитизирован. Кварц ксеноморфный с отчетливым волнистым погасанием. Калишпат дает сростки с плагиоклазом, сильно пелитизирован. Роговая обманка буровато-зеленого и бледно-зеленого цвета образует идиоморфные лейсты и сростки с биотитом. Отмечаются отдельные чешуйки мусковита. Из аксессуарев отмечен апатит. Общая щёлочность породы ($Na_2O + K_2O$) варьирует от 5,72 до 6,05; тип щёлочности – преобладание натрия над калием, или наоборот (Na_2O/K_2O) – 0,99–1,16; коэффициент глинозёмности Al^I – 2,6–3,05; коэффициент фемичности $f = Fe_2O_3 + FeO + MgO + MnO + TiO_2$ – 5,57–6,24; коэффициент аргитности $K_a = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$ – 0,53–0,55. В единичных знаках в гранодиоритах встречаются золото, тетрадимит, арсенопирит, шеллит, киноварь, малахит. Присутствие широкого круга рудных и скарновых минералов-аксессуарев в гранодиоритах указывает на их активное участие как минимум в предрудном процессе (золото-скарновая стадия), вероятно, в ранних рудных стадиях.

Граниты представляют собой светло-серые, бледно-коричневые разности массивной текстуры. По составу темноцветных минералов подавляющая часть гранитов относится к биотитовым (более выветрелые, рассыпающиеся до гранитной дресвы); менее развиты роговообманково-биотитовые разности, а существенно роговообманковые – встречаются в единичных случаях. Минеральный состав гранитов (%): кварц 60, калиевый полевой шпат 5–15 в биотитовых разностях, до 25–30 в роговообманково-биотитовых; биотит 3–5; роговая обманка до 8. Плагиоклаз образует в основном крупные субидиоморфные зерна таблитчатой формы размером до 3–4 мм, иногда хорошо развиты полисинтетические двойники, нередко наблюдается нормальная зональность (смена от ядерной части к периферии – андезина олигоклазом). Центральные части зерен сосюритизированы. Калишпат-1 образует небольшие ксеноморфные зерна, расположенные в интерстициях других минералов. Наблюдается присутствие вторичного калиевого полевого шпата (до 35–40 %) с отчетливым метасоматическим замещением плагиоклаза с образованием реликтовых скелетных форм. Кварц двух генераций: первая даёт округлые и неправильные формы размерами до 2–3 мм с характерным волнистым погасанием, иногда придающие породе порфирированный облик; вторая генерация – это тонкозернистый агрегат совместно с калиевым полевым шпатом. Биотит темно-бурого до черного цвета в виде табличек без концевых граней по породе распределен неравномерно, с ним ассоцииру-

ет вкрапленный лимонитизированный пирит; иногда на биотит наложена мусковитизация. Роговая обманка образует идиоморфные зерна размером до $1,7 \times 1,0$ – $2,5 \times 3,5$ мм или мелкие скопления, иногда замещена эпидотом и рудным минералом до образования скелетных форм. Из аксессуарев отмечаются циркон, лейкоксен, реже рутил, апатит.

Абсолютная датировка гранитов Топольнинского комплекса

Места отбора проб на определение абсолютного возраста показаны на рис. 1.

Порода, по которой определён возраст Методом SHRIMP II в Лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург), массивная, мезократовая, регрессивно преобразованная с гипидиоморфнозернистой структурой. Лейкократовые минералы, составляющие 85–88 % ее объема, представлены призматически-таблитчатыми зёрнами интенсивно деанортитизированного андезина – 40An–60Ab – 40–45 %, ксеноморфными зёрнами калиевого полевого шпата – 15–18 %, гетерозернистым кварцем – 25–30 %. Меланократовые минералы – 10–15 % объема породы – представлены реликтами клинопироксена, по которым развита роговая обманка и замещающий ее актинолит, биотитом красновато-коричневой окраски, по которому развит вторичный зеленовато-бурый биотит. Рудные минералы представлены магнетитом, титаномагнетитом; аксессуарные минералы – апатитом, сфеном, цирконом, ортитом.

Вид структуры породы в шлифе представлен на фотографии (рис. 2).

На TAS ($Na_2O + K_2O - SiO_2$)-диаграмме эффузивных аналогов фигуративные точки химического состава пород расположены в полях фигуративных точек семейства риодацитов, низкощелочных риодацитов (рис. 3).

По совокупности петрологических параметров обе исследованные породы относятся к высокоглинозёмистым плутоническим образованиям известково-щелочного (нормального) ряда, калинаторовой серии, принадлежат к семейству гранодиоритов, виду гранодиорит, разновидности – *гранодиорит клинопироксен-биотитовый*.

По редкоземельной характеристике – содержанию и характеру распределения REE – гранодиориты топольнинского комплекса близки к образованиям континентальной земной коры (рис. 4). При этом гранодиориты Топольнинского массива (проба № 15482) формировались с участием мантийного вещества (отсутствует Eu минимум) и преобразованы в условиях высокой фугитивности кислорода.

Морфологические типы цирконов в исследуемой породе показаны на фото (рис. 5).

Цирконы проб Топольнинского и Караминского массивов совершенно идентичные: прозрачные слегка желтоватого цвета. Кристаллы идиоморфные, габитус призматический, тип гиадинтовый и

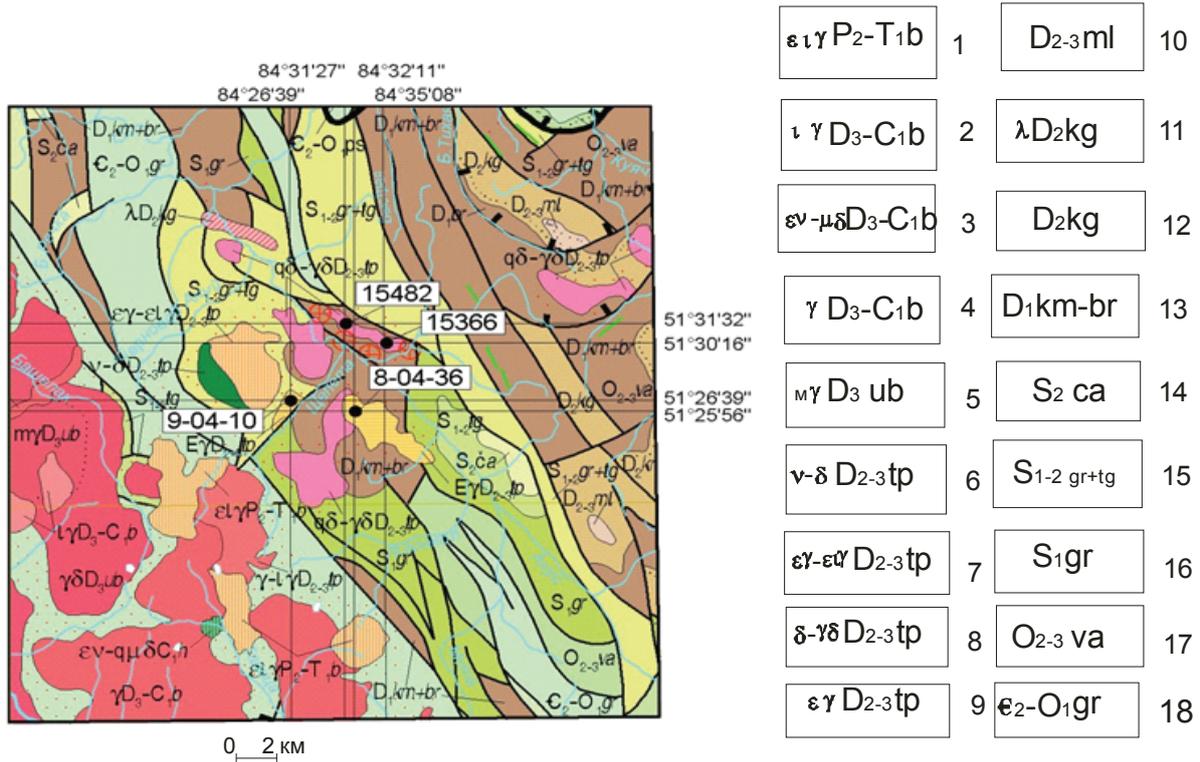


Рис. 1. Схема Топольнинского участка по В.А. Кривчикову [1] и отбора проб на абсолютный возраст. 1 – умеренно-щелочные лейкограниты белокурихинского комплекса; Боровлянский комплекс: 2 – лейкограниты, 3 – щелочные габбро-кварцевые диориты, 4 – граниты; 5 – меланограниты усть-беловского комплекса; Топольнинская ассоциация: 6 – габбро-диориты, 7 – граносиениты – умеренно-щелочные лейкограниты, 8 – кварцевые диориты, диориты, гранодиориты; 9 – граносиениты; 10 – терригенные отложения малафеевской свиты; 11 – риолиты куйяганской свиты; 12 – вулканогенно-осадочные образования куйяганской свиты; 13 – нерасчленённые отложения камышенской и барагашской свит; 14 – терригенные отложения черноануйской свиты; 15 – нерасчленённые терригенные отложения громотухинской и тегерекской серий; 16 – терригенные отложения громотухинской серии; 17 – нерасчленённые терригенные отложения верхнеануйской серии; 18 – терригенные отложения горноалтайской серии

Fig. 1. Diagram of Topolninsky area by V.A. Krivchikov [1] and sampling for absolute age. 1 – moderate-alkaline leucogranites of Belokurikha complex; Borovlyansky complex: 2 – leucogranites, 3 – alkaline gabbro-quartz greenstones, 4 – granites; 5 – melanogranites of Ust-Belovsk complex; Topolninsk assemblage: 6 – gabbro greenstones, 7 – granosyenites – moderate-alkaline leucogranites, 8 – quartz greenstones, greenstones, granodiorites; 9 – granosyenites; 10 – terrigenous sediments of Malafeyevskaya strata; 11 – rhyolites of Kuyaganskaya strata; 12 – volcanic sedimentary formations of Kuyaganskaya strata; 13 – poorly defined formations of Kamyshenskaya and Baragashskaya stratas; 14 – terrigenous sediments of Chernouyanskaya strata; 15 – poorly defined terrigenous formations of Gromotukhinskaya and Tegerekskaya series; 16 – terrigenous formations of Gromotukhinskaya series; 17 – poorly defined terrigenous formations of Verkhneanuyanskaya series; 18 – terrigenous formations of Gornoaltayskaya series



Рис. 2. Гипидиоморфнозернистая структура гранита (шлиф № 15366)

Fig. 2. Hypidiomorphic-Granular Texture of granite (slide no. 15366)

цирконовый с отчетливой тонкой зональностью. Удлинение от 2 до 3–4. По содержаниям $U=164-557$, $Th=47-289$ г/т они также совершенно идентичны, отношение Th/U в обеих пробах почти совпадают – 0,28–0,58. Полученные конкордантные возраст для Топольнинского массива по 10 точкам $397,4 \pm 4,4$ млн лет, Караминского массива $399,3 \pm 4,6$ млн лет соответствуют границе нижнего и среднего девона и могут быть приняты в качестве возраста становления топольнинского комплекса (ранний–средний девон).

Представительные анализы разновидностей пород топольнинского комплекса интрузий сведены в таблицу.

Для всех пород топольнинского комплекса характерны высокие отношения Th/U , превышающие 1, что указывает на относительно свежие по-

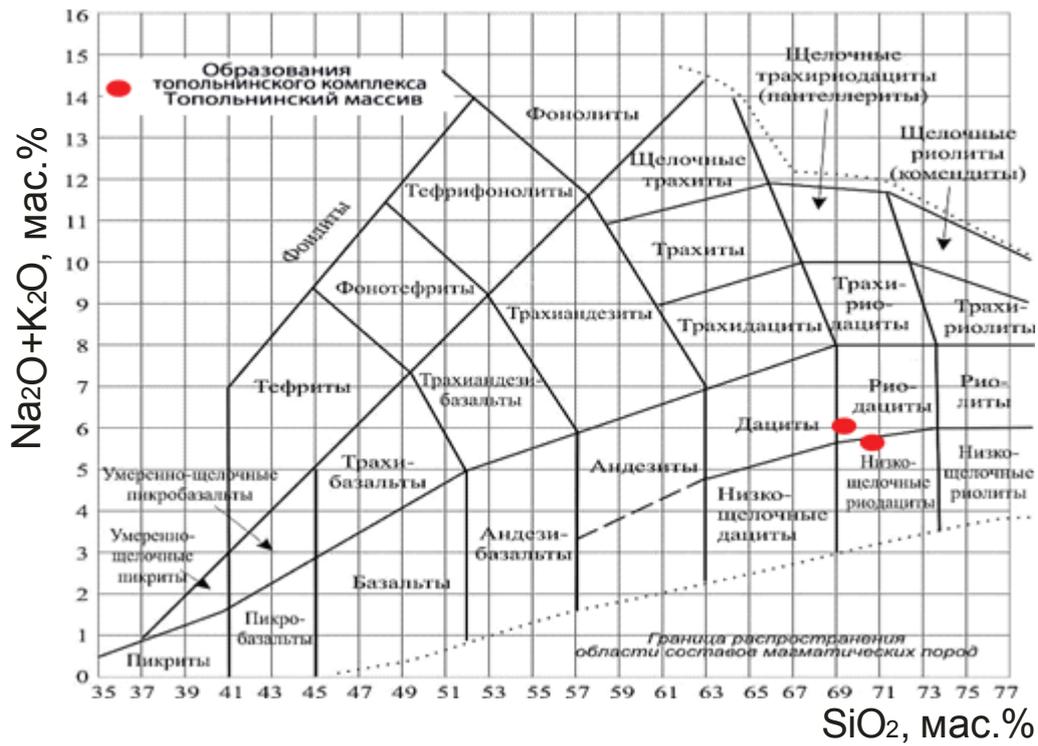


Рис. 3. Диаграмма $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$ для гранодиорита Топольнинского массива

Fig. 3. Diagram $(Na_2O+K_2O) - SiO_2$ for granitoid of Topolinsky massif

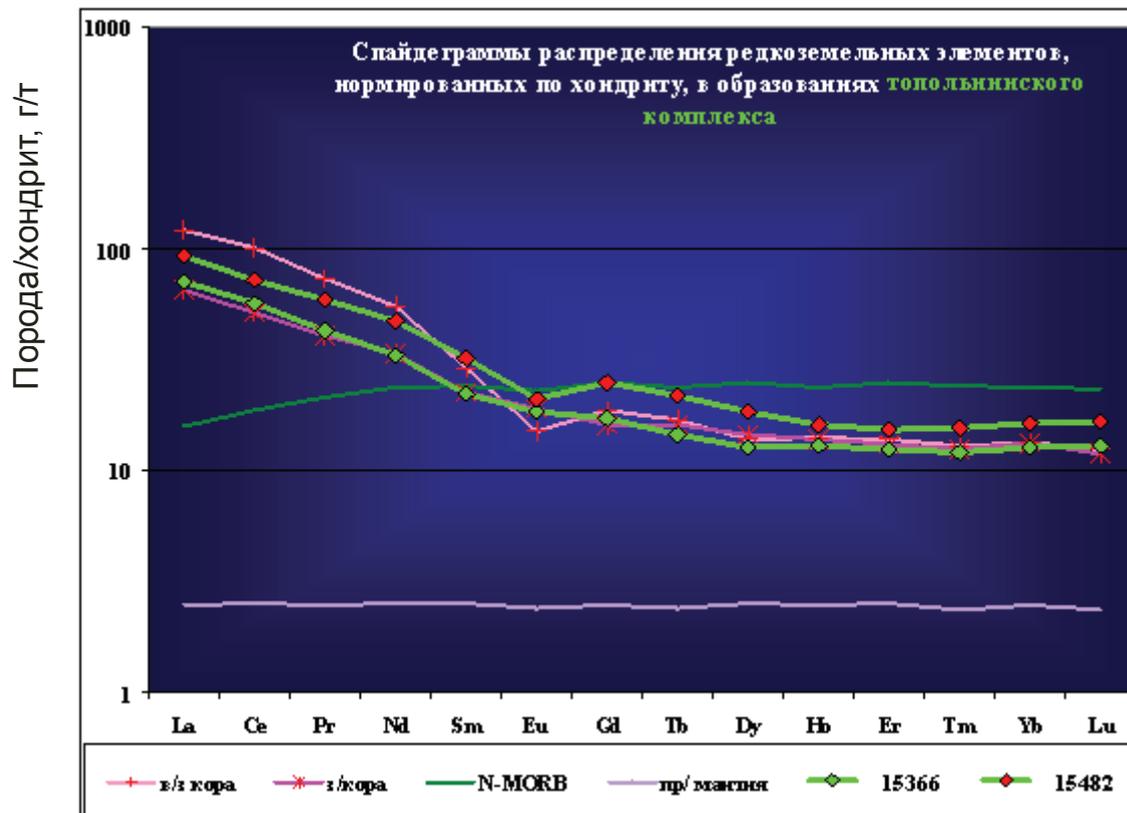


Рис. 4. Спайдер-диаграмма для пород Топольнинского массива

Fig. 4. Spider plot for the rocks of Topolinsky massif

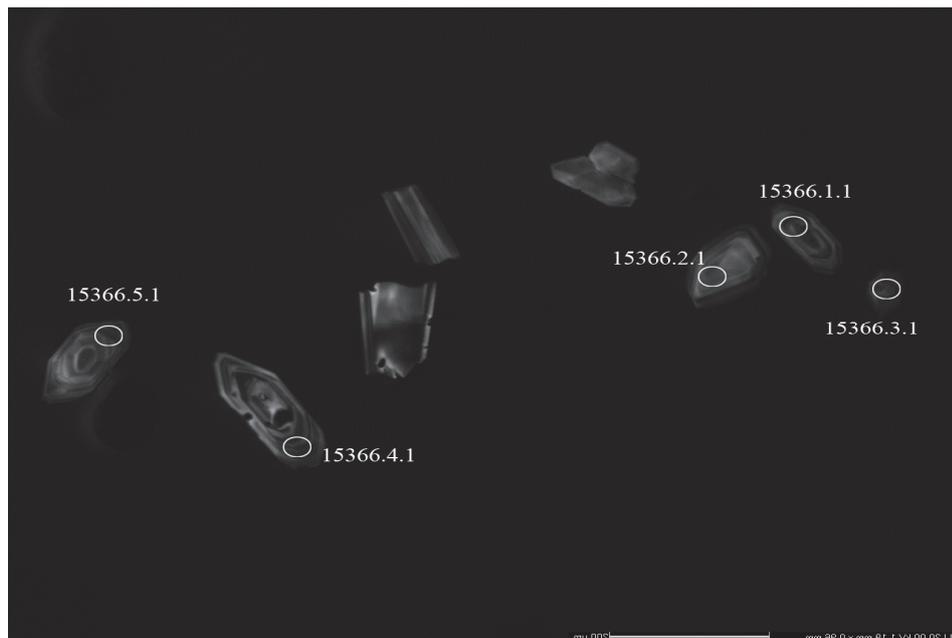


Рис. 5. Морфология кристаллов циркона, по которым определён абсолютный возраст (увеличение >1000)

Fig. 5. Morphology of zircon crystals which was used for determining absolute age (increase >1000)

роды, не изменённые гидротермальными наложенными процессами. Eu/Eu^* отношения сравнительно высокие. На диаграмме модели распределения РЗЭ выявляется слабо проявленный европиевый минимум только для лейкогранитов (рис. 6).

Нормированные отношения лантана к иттербию сравнительно невысокие. Они слабо повышены в кислых породах (до 4,9–5,6), указывающих на дифференцированный тип распределения РЗЭ в них. Величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ во всех разностях не превышают значимых величин для М-типа (граничное значение выше 1,1).

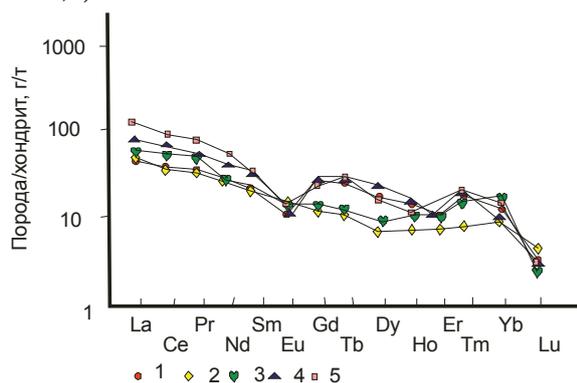


Рис. 6. Модель распределения РЗЭ, нормированных относительно хондрита по [5] для породных типов интрузий топольнинского комплекса: 1 – габбро, 2 – кварцевый диорит, 3 – гранодиорит, 4 – гранодиорит, 5 – гранит, 6 – лейкогранит

Fig. 6. Model of distribution of REE normalized relative to chondrite by [5] for rock types of intrusions of Topolninsky complex: 1 – gabbro, 2 – quartz greenstone, 3 – granodiorite, 4 – granodiorite, 5 – granite, 6 – leucogranite

Ранее нами установлено, что гранитоиды Топольнинского и Караминского массивов нормируются в I-тип Sr-недеплетированных и Y-недеплетированных гранитоидов [7], что связано с формированием их за счёт плавления плагиоклаз-содержащего источника [8, 9]. На мантийный источник расплавов и контаминацию корового материала указывают также и значения отношений $^{87}Sr/^{86}Sr$, которые составляют: для гранодиоритов Топольнинского массива 0,70556, а для Караминских лейкогранитов 0,70618 [7]. По соотношениям $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg$ по биотитам Топольнинской МРМС устанавливается более окисленное состояние расплава, а его кристаллизация осуществлялась ближе к гематит-магнетитовому буферу. Это находит подтверждение и в наличии более окисленных форм акцессорных минералов – магнетита и сфена. Биотиты Караминской МРМС тяготеют к никель-бунзенитовому буферу, указывая на более восстановленный режим расплава, чем для Топольнинских гранитоидов. В составе акцессориев Караминских гранитоидов присутствует более восстановленная фаза – ильменит [7].

На спайдер-диаграмме (рис. 7) отчётливо проявлены негативные аномалии по Nb, Ti, что характерно для вулканических пород из субдукционных зон [10].

На диаграмме соотношений $Ba/Nb-La/Nb$ интрузивные породы топольнинского комплекса тяготеют к полю распространения вулканических дуг (рис. 8).

На диаграмме $(La/Yb)_N-(Yb)_N$ породы топольнинского комплекса попадают на тренды плавления амфиболитов и гранатовых амфиболитов (рис. 9).

Таблица. Представительные химические составы пород топольнинского комплекса (оксиды в мас. %, микроэлементы в г/т)

Table. Representative chemical compositions of the rocks of Topolninsky complex (oxides are in wt. %, microelements are in g/t)

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	51,83	60,3	67,9	68,8	70,1	75,12
TiO ₂	1,11	0,73	0,51	0,5	0,36	0,16
Al ₂ O ₃	17,05	15,22	14,9	14,4	14,8	12,62
Fe ₂ O ₃	4,03	2,96	1,07	1,12	1,33	0,74
FeO	6,2	3,6	2,62	2,99	1,73	1,66
MnO	0,16	0,13	0,07	0,11	0,09	0,08
MgO	4,92	2,32	1,19	1,43	0,91	0,3
CaO	8,4	5,55	3,76	3,47	2,98	0,81
Na ₂ O	3,3	3,5	3,18	2,81	3,38	3,79
K ₂ O	0,75	3,0	2,75	2,83	3,18	4,13
P ₂ O ₅	0,18	0,19	0,12	0,13	0,09	0,15
Потери после прокаливания Losses after ignition	2,1	2,0	1,65	0,97	0,9	0,5
Сумма/Total	100,03	99,5	99,72	99,56	100,0	100,06
La	20,8	19,5	17,3	22,8	24,0	32,3
Ce	35,6	35,8	36,2	46,3	54,7	67,8
Pr	5,27	4,97	4,1	5,72	6,33	8,9
Nd	18,8	16,7	15,8	22,4	24,7	32,3
Sm	4,2	3,9	3,4	4,96	6,04	7,2
Eu	1,4	1,2	1,07	1,23	1,3	0,84
Gd	4,6	3,8	3,51	5,11	6,12	6,5
Tb	0,82	0,75	0,55	0,82	0,9	1,2
Dy	5,2	4,3	3,23	4,67	5,56	6,3
Ho	1,01	0,95	0,74	0,91	1,17	1,3
Er	2,56	3,3	2,07	2,56	3,39	3,2
Tm	0,58	0,45	0,31	0,4	0,57	0,6
Yb	4,5	3,3	2,1	2,71	3,26	3,8
Lu	0,55	0,6	0,33	0,42	0,51	0,4
ΣPЗЭ/ΣREE	105,9	99,5	90,7	121	138,05	172,6
V	125	65	47,5	45,1	42,4	15,1
Cr	63,5	51	35,1	33,5	32,3	25,1
Co	45,1	36	9,5	8,2	7,74	2,5
Ni	39,8	53	5,2	4,1	3,08	2,1
Zn	95	55	65,4	60,8	63,1	10,5
Rb	45	38	91,5	85,9	64,5	102
Sr	280	600	570	195	197	105
Nb	5,6	2,7	2,0	2,1	9,03	8,7
Cs	1,9	0,8	2,2	2,5	2,43	2,5
Ba	650	612	950	1030	529	590
Pb	7,1	12,0	7,5	5,1	11,9	17,1
Th	2,3	4,5	8,1	7,4	10,8	12,8
Y	25,5	35,5	22,5	20,3	33,3	29,7
Ga	16,3	23,1	16,1	16,1	15,2	14,8
Zr	111	90	65	60	151	122
Sc	48,7	33	16,1	15,5	13,7	4,8
Hf	2,8	3,1	2,0	1,8	4,07	4,3
Ta	0,45	0,6	0,63	0,65	0,66	0,9
Mo	0,7	5,7	1,14	1,15	1,18	2,2
Sb	0,5	0,15	0,17	0,18	0,2	0,4
Sn	1,3	12,0	1,35	1,43	1,44	2,2
Be	1,2	1,1	1,55	1,65	1,85	2,1

Окончание таблицы

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6
U	0,9	2,0	2,8	3,0	1,8	2,2
Li	19,5	11,5	26,4	26,5	26,6	13,5
Ag	0,012	0,01	0,011	0,011	0,012	0,03
(La/Yb)N	3,05	3,9	5,4	5,6	4,9	5,6
Nb/Ta	12,4	4,5	3,2	3,2	13,7	9,7
Eu/Eu*	0,98	0,95	0,91	0,75	0,62	0,37
Th/U	2,55	2,25	2,9	2,5	6,0	5,8
TE _{1,3}	1,01	1,03	1,02	1,01	0,99	1,05
(La/Sm)N	3,04	3,06	3,12	2,82	2,21	2,75
(Gd/Yb)N	0,82	0,92	1,45	1,51	1,50	1,37
Ba/Nb	31,25	31,4	54,9	45,1	22,0	18,3
La/Nb	3,7	7,2	8,65	10,87	2,65	3,71
Ce/Y	1,4	1,0	2,3	2,87	3,6	2,28

Примечание: главные компоненты определены химическим методом в лаборатории Западно-Сибирского испытательного центра (г. Новокузнецк); для микроэлементов – методом ICP-MS в лаборатории ИМГРЭ (г. Москва). Значения PЗЭ нормированы по хондриту по Anders E., Greevesse N. [5]. $Eu^* = (Sm_N + Gd_N) / 2$. TE – тетрадный эффект фракционирования PЗЭ по Irber [6]. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования PЗЭ, как среднее между первой и третьей тетрадами. Породы топольнинского комплекса: 1 – габбро, 2 – кварцевый диорит, 3 – гранодиорит, 4 – гранодиорит, 5 – гранит, 6 – лейкогранит.

Note: silicate analysis for the main components was carried out by the chemical method in the Laboratory of Western-Siberian test center (Novokuznetsk), for microelements – by ICP-MS methods in IMGRE laboratory (Moscow). The values of REE were standardized by chondrite by Anders E., Greevesse N. [5]. $Eu^* = (Sm_N + Gd_N) / 2$. TE is a tetrad effect of REE fractioning by Irber [6]. TE_{1,3} is the tetrad effect of REE fractioning as a mean between the first and the third tetrads. The rocks of Topolninsky complex: 1 – gabbro, 2 – quartz greenstone, 3 – granodiorite, 4 – granodiorite, 5 – granite, 6 – leucogranite.

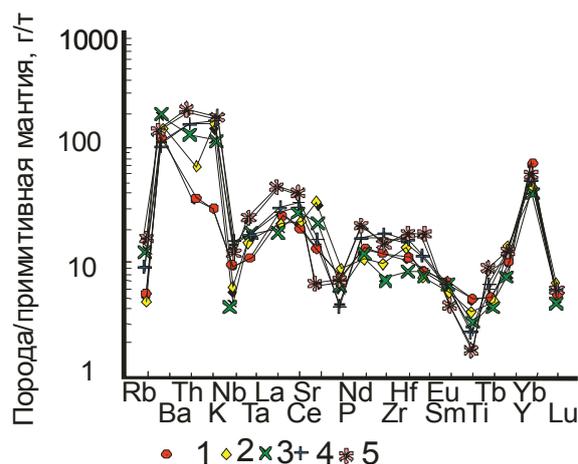


Рис. 7. Спайдер-диаграмма микроэлементов, нормированных по примитивной мантии по [11] для интрузивных пород топольнинского комплекса. Условные обозначения на рис. 5

Fig. 7. Spider plot of microelements normalized by primitive mantle by [11] for intrusive rocks of Topolninsky complex. The same symbols as in Fig. 5.

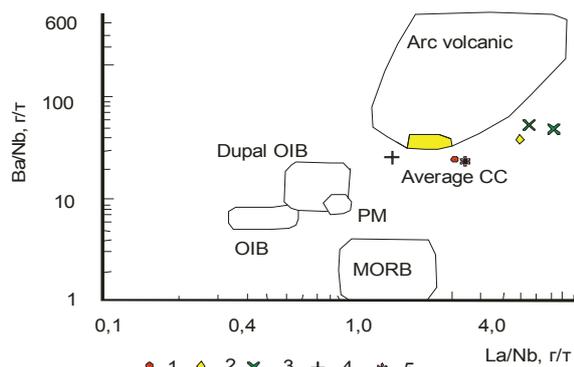


Рис. 8. Диаграмма Ba/Nb-La/Nb для интрузивных пород топольнинского комплекса. Данные по примитивной мантии (PM) по Sun, McDonough [11]; средней континентальной коры (CC) по Taylor, McLennan [12]; данные по OIB, MORB по Le Roux [13]; данные по составам вулканических дуг по [14]. Условные обозначения на рис. 5

Fig. 8. Ba/Nb-La/Nb diagram for intrusive rocks of Topolninsky complex. Data on primitive mantle are by Sun, McDonough [11]; the data on average continental crust are by Taylor, McLennan [12]; the data on OIB, MORB are by Le Roux [13]; the data on composition of volcanic arcs are by [14]. The symbols are the same as in Fig. 5

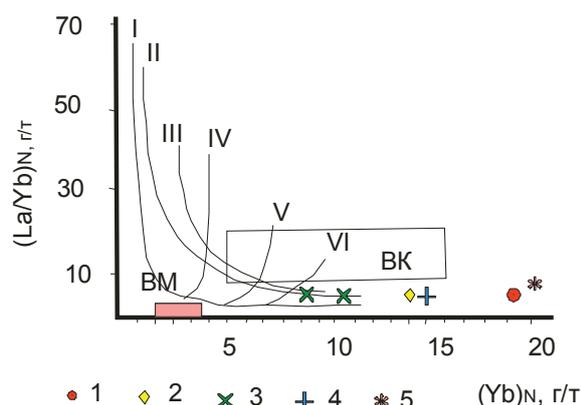


Рис. 9. Диаграмма $(La/Yb)_N-(Yb)_N$ по Barbarin [15, 16] для интрузивных пород топольнинского комплекса. Тренды плавления различных источников: I – кварцевые эклогиты; II – гранатовые амфиболиты; III – амфиболиты; IV – гранатосодержащая мантия, с содержанием граната 10 %; V – гранатосодержащая мантия, с содержанием граната 5 %; VI – гранатосодержащая мантия, с содержанием граната 3 %; BM – верхняя мантия; BK – верхняя кора. Остальные условные обозначения на рис. 5.

Fig. 9. $La/Yb)_N-(Yb)_N$ diagram by Barbarin [15, 16] for intrusive rocks of Topolninsky complex. Trend for melting of different sources: I – quartz eclogite; II – garnetiferous amphibolites; III – amphibolites; IV – garnetiferous mantle, garnet content is 10 %; V – garnetiferous mantle, garnet content is 5 %; VI – garnetiferous mantle, garnet content is 3 %; BM is upper mantle; BK is upper crust. The rest symbols are the same as in Fig. 5

На диаграмме La/Nb-Ce/Y интрузивные породы топольнинского комплекса тяготеют к тренду смешения мантийной магмы с коровым материалом (рис. 10).

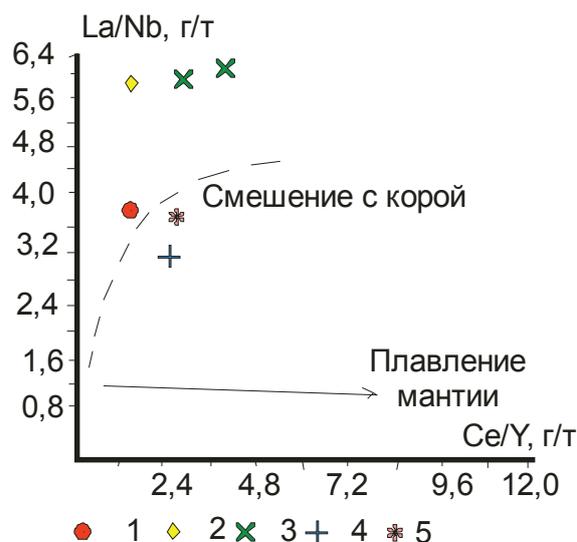


Рис. 10. Диаграмма La/Nb-Ce/Y по [16] для пород топольнинского комплекса. Условные обозначения на рис. 5

Fig. 10. La/Nb-Ce/Y diagram by [16] for the rocks of Topolninsky complex. The symbols are the same as in Fig. 5

В пределах Топольнинского рудного поля получили развитие различные типы эндогенного оруденения, обнаруживающие пространственную и парагенетическую связь с гранитоидами: жильное медно-сульфидное, золото-медно-скарновое, золото-черносланцевое.

Интерпретация результатов

Зональность размещения гранитоидных разновидностей по вертикали и горизонтали не случайна и может быть объяснена следующими факторами.

- 1) процессами ассимиляции вмещающих пород краевыми частями внедряющейся гранитной магмы с образованием контаминированных разновидностей более основного состава;
- 2) дифференциацией магматического расплава с ранней кристаллизацией плагиоклаз-темноцветного агрегата в апикальных частях массива и последующей более поздней кристаллизацией субсолидусного полевошпат-кварцевого расплава (принцип Core);
- 3) прямой зональностью сложных габбро-гранитных плутонов, в которой более эволюционированные фазы (граниты, лейкограниты) локализируются в центре массивов, а по периферии – менее эволюционированные – породы первых фаз внедрения (габброиды, диориты); контакты между фазами постепенные с конкордантными или слабо конкордантными текстурами и переходами.

Наши данные показывают, что гранитоиды Топольнинского интрузивного ареала обнаруживают геохимические параметры, указывающие на их образование за счёт плавления вулканогенных пород островодужного типа, их смешения с коровым материалом, а также мантийного материала пространственную и парагенетическую связь различ-

ных типов оруденения золота (золото-медно-скарновое, жильное золото-сульфидно-кварцевое, золото-черносланцевое) с глубинным очагом, формировавшим плутонические и дайковые серии пород Топольнинского ареала [17]. Соотношения изотопов стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) свидетельствуют о мантийной природе расплавов, формировавшихся с участием контаминации корового материала. Характер зональности таких плутонов интерпретируется как результат химической дифференциации глубинного магматического очага и скорости поступления последовательных фаз. В случае быстрого поступления фаз и отдельных пульсаций предыдущие поступления не успевают закристаллизоваться и более поздние фазы их легко прорывают и располагаются в центре плутонов с формированием нормальной зональности [18], что имеет место в случае

Караминского интрузива. Подобная нормальная зональность строения интрузивов отмечена нами для Айского и Синюхинского [19, 20] интрузивов.

Заключение

Таким образом, уточнен возраст гранитоидов топольнинского комплекса, который следует датировать границей между ранним и средним девоном (вместо ранее считавшегося средне-девонским). В Караминском массиве выявлена прямая зональность в распределении разных фаз внедрения. По многочисленным показателям, в том числе и изотопным соотношениям стронция, выявляется мантийно-коровое взаимодействие при формировании гранитоидов комплекса. Гранитоиды формировались при плавлении амфиболитов и гранатовых амфиболитов, имевших островодужную природу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривчиков В.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Алтайская серия. Лист М-45-1. – СПб.: Изд-во карт-фабрики ВСЕГЕИ, 2000. – 236 с.
2. Гусев А.И., Гусев Н.И., Табакаева Е.М. Золотогенерирующие гранитоиды Топольнинского ареала Горного Алтая: возраст, петрология и геохимия // Современные наукоёмкие технологии. – 2012. – № 1. – С. 8–12.
3. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области / С.П. Шокальский, Г.А. Бабин, А.Г. Владимиров, С.М. Борисов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. – 187 с.
4. Владимиров А.Г., Козлов М.С., Шокальский С.П. Главные возрастные рубежи интрузивного магматизма Кузнецкого Алатау, Алтай и Калбы (по данным U-Pb изотопного датирования) // Геология и Геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 8. – С. 1149–1170.
5. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
6. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/No, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1999. – V. 63. – № 3/4. – P. 489–508.
7. Гусев А.И., Гусев Н.И. Золото-генерирующие рудно-магматические системы Горного Алтая // Руды и металлы. – 1998. – № 2. – С. 67–78.
8. Wyborn L.A.I., Wyborn D., Chappel B.W. Geological evolution of granite compositions with time in the Australian continent – implications for tectonic and mantle process // *Geol. Soc. Austr. Abstr.* – 1988. – V. 21. – P. 434–435.
9. Proterozoic granite types in Australia: implications of lower crust composition, structure and evolution / L.A.I. Wyborn, D. Wyborn, R.G. Warren, B.J. Drummond // *Trans. Royal. Edinburgh: Earth Sciences.* – 1992. – V. 83. – P. 201–209.
10. Tatsumi Y., Kogiso T. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: 2. Origin of chemical and physical characteristics in arc magmatism // *Earth and Planetary Science Letters.* – 1997. – V. 148. – P. 207–221.
11. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implication and processes // *Geological Society of London. Special Publication.* – 1989. – № 42. – P. 313–345.
12. Taylor S.R., McClelland S.M. The continental crust: composition and evolution. – Boston: Blackwell Scientific Publications, 1985. – 355 p.
13. Le Roux A.P. Geochemical correlation between Southern African kimberlites and South Atlantic hot spot // *Nature.* – 1986. – V. 324. – P. 243–245.
14. Jahn B.M., Zhang Z.Q. Archean granulite gneisses from eastern Hebei province, China: rare earth geochemistry and tectonic implication // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* – 1984. – V. 85. – P. 224–243.
15. Barbarin B. Granitoids: main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting // *Geol. Journ.* – 1990. – V. 25. – Pp. 227–238.
16. Barbarin B. A Review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments // *Lithos.* – 1999. – V. 46. – P. 605–626.
17. Гусев А.И., Гусев Н.И., Табакаева Е.М. Петрология и рудоносность магмо-рудно-метасоматических систем Солонешенского рудного района Алтая. – Бийск, АГАО, 2013. – 205 с.
18. Vigneresse J.L. The role of discontinues magma inputs in felsic magma and ore generation // *Ore geology Reviews.* – 2007. – V. 30. – P. 181–216.
19. Гусев А.И. Интрузивный магматизм Синюхинского золоторудного узла // Геология и геофизика. – 1994. – № 11. – С. 28–40.
20. Гусев А.И. Эталон синюхинского габбро-гранитного комплекса (Горный Алтай). – Новосибирск: СНИИГТИМС, 2007. – 208 с.

Поступила 14.11.2014 г.

UDC 552.3:550.4:550.42:550.93

NEW DATA ON GEOCHEMISTRY AND PETROLOGY OF TOPOLNINSKY COMPLEX IN GORNYY ALTAI

Anatoliy I. Gusev,

Dr. Sc., Shukshin Altai State Academy of Education, 11, Sovetskaya street, Biysk, 659333, Russia. E-mail: anzerg@mail.ru

Aleksandr F. Korobeynikov,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lev@tpu.ru

Nikolay I. Gusev,

Cand. Sc., Karpinsky Russian Geological Institute, Eastern Siberia Dep., 74, Sredny prospect, St-Petersburg, 199106, Russia. E-mail: nikolay_gusev@vsegei.ru

Mariya A. Kukoeva,

Cand. Sc., Shukshin Altai State Academy of Education, 11, Sovetskaya street, Biysk, 659333, Russia. E-mail: kukoeva@mail.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need of researching petro-geochemistry and petrologic peculiarities of gabbro-granitoid complexes which are related with gold-copper-skarn ore mineralization.

The main aim of the research is to study geochemistry of rock types of Topolninsky complex in Gornyy Altai using canonic classification and experimental diagrams on genesis and petrology of magmatites.

The methods used in the study. Chemical composition of the major petrogenic elements was determined by silicate assay by X-ray fluorescence (XRF) techniques. Rare elements were determined by inductively coupled plasma on the mass spectrometry «OPTIMA-4300», for Cu, Zn, Pb, Li – by methods of ISP-AES, the rest elements, including REE were determined by ISP-MS methods in the VSEGEI Laboratory (St-Petersburg). Absolute age of granitoids was defined by U-Pb method SHRIMP II on zircon in the VSEGEI Laboratory (St-Petersburg).

Results. The authors have corrected the absolute age of granitoids formation in Topolninsky complex. For Topolninsky massif by 10 point it is $397,4 \pm 4,4$ million years, for Karaminsky massif it is $399,3 \pm 4,6$ million years, corresponding to a border of Lower and Middle Devonian. The paper describes a direct zoning in Karaminsky massif formation. More evolution phases of leucogranites in it are located in the center of massif but early gabbros are on the periphery. The authors estimated different petrochemical coefficients, indices, modules for the rocks of the complex used for decoding the genesis. The ratios of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for granodiorites of Topolninsky massif is 0,70556, but for Karaminsk leucogranites is 0,70618) identify mantle nature of melts, formed with crust material contamination. The paper indicates the space and paragenetic relation of different types of ore mineralization with granitoids of Topolninsky complex.

Key words:

Granitoids, complex, absolute age, zoning massif, petrochemistry, mantle-crust interaction, ore mineralization, strontium isotopes, gold, copper.

REFERENCES

1. Krivchikov V.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200000. Altayskaya seriya. List M-45-I* [State geological map of the Russian Federation scale 1:200000. Altai series. Blade M-45-I]. Saint-Petersburg, VSEGEI map Publishing, 2000. 236 p.
2. Gusev A.I., Gusev N.I., Tabakaeva E.M. Zolotogeneriruyushchie granitoidy Topolninskogo areala Gornogo Altaya: vozrast, petrologiya i geokhimiya [Gold generation granitoids of Topolninskii areal mountain Altai: age, petrology and geochemistry]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2012, no. 1, pp. 8–12.
3. Shokalsky S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Borisov S.M. *Korrelyatsiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov zapadnoy chasti Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti* [Correlation of magmatic and metamorphic complexes of the western part of the Altai-Sayan folded region]. Novosibirsk, SB RAN Press, filial «Geo», 2000. 187 p.
4. Vladimirov A.G., Kozlov M.S., Shokalsky S.P. *Glavnye vozrastnye rubezhi intruzivnogo magmatizma Kuznetskogo Alatau, Altaya i Kalby (po dannym U-Pb izotopnogo datirovaniya)* [The basic age boundaries intrusive magmatism of Kuznekkii Alatau, Altai and Kalba (on the data of U-Pb isotope dating)]. *Geology and geophysics*, 2001, vol. 42, no. 8, pp. 1149–1170.
5. Anders E., Greevesse N. Abundences of the elements: meteoric and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, vol. 53, pp. 197–214.
6. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, vol. 63, no. 3, pp. 489–508.
7. Gusev A.I., Gusev N.I. Zolotogeneriruyushchie rudno-magmaticheskie sistemy Gornogo Altaya [Gold generation ore-magmatic systems of Mountain Altai]. *Ore and metals*, 1998, no. 2, pp. 67–78.
8. Wyborn L.A.I., Wyborn D., Chappel B.W. Geological evolution of granite compositions with time in the Australian continent – implications for tectonic and mantle process. *Geol. Soc. Austr. Abstr.*, 1988, vol. 21, pp. 434–435.
9. Wyborn L.A.I., Wyborn D., Warren R.G., Drummond B.J. Proterozoic granite types in Australia: implications of lower crust composition, structure and evolution. *Trans. Royal. Edinburgh: Earth Sciences*, 1992, vol. 83, pp. 201–209.

10. Tatsumi Y., Kogiso T. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: 2. Origin of chemical and physical characteristics in arc magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, vol. 148, pp. 207–221.
11. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implication and processes. *Geological Society of London. Special Publication*, 1989, no. 42, pp. 313–345.
12. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: composition and evolution*. Boston, Blackwell Scientific Publications, 1985. 355 p.
13. Le Roux A.P. Geochemical correlation between Southern African kimberlites and South Atlantic hot spot. *Nature*, 1986, vol. 324, pp. 243–245.
14. Jahn B.M., Zhang Z.Q. Archean granulite gneisses from eastern Hebei province, China: rare earth geochemistry and tectonic implication. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, vol. 85, pp. 224–243.
15. Barbarin B. Granitoids: main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting. *Geol. Journ.*, 1990, vol. 25, pp. 227–238.
16. Barbarin B. A Review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 605–626.
17. Gusev A.I., Gusev N.I., Tabakaeva E.M. Petrologiya i rudonostnost magmo-rudno-metasomaticheskikh sistem Soloneshenskogo rudnogo rayona Altaya [Petrology and ore mineralization of magmatic-ore-metasomatic systems of Soloneshenskii ore district of Altai]. Biysk, AGAO Publ., 2013. 205 p.
18. Vigneresse J.L. The role of discontinues magma inputs in felsic magma and ore generation. *Ore geology Reviews*, 2007, vol. 30, pp. 181–216.
19. Gusev A.I. Intruzivny magmatizm Sinyukhinskogo zolotorudnogo uzla [Intrusive magmatism of Sinyukhinskoe gold district]. *Geology and geophysics*, 1994, no. 11, pp. 28–40.
20. Gusev A.I. Etalon sinyukhinskogo gabbro-granitnogo kompleksa (Gorny Altay) [Standard of Sinyukhinsky gabbro-granitic complex (Mountain Altai)]. Novosibirsk, SNIIGiMS Press, 2007. 208 p.

Received: 14 November 2014.

УДК 665.613+617:550.84

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ НЕФТИ КРАПИВИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Торломоева Алтынай Эженовна,

магистрант кафедры биотехнологии и органической химии
Института физики высоких технологий Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, д. 30. E-mail: azot@ipc.tsc.ru

Чешкова Татьяна Викторовна,

канд. хим. наук, мл. науч. сотр. лаборатории гетероорганических
соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения
Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4.
E-mail: chtv12@mail.ru

Коваленко Елена Юрьевна,

канд. хим. наук, науч. сотр. лаборатории гетероорганических соединений
нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии
наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: azot@ipc.tsc.ru

Сагаченко Татьяна Анатольевна,

д-р хим. наук, введущ. науч. сотр. лаборатории гетероорганических
соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения
Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4.
E-mail: dissovets@ipc.tsc.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения детальной информации о составе углеводородов и структуре молекул смолисто-асфальтеновых компонентов нефти Крапивинского месторождения для решения проблем, возникающих при ее добыче, транспортировке и переработке, а также для рационального использования нефтепродуктов, получаемых на ее основе.

Цель работы: установление состава и строения масляных компонентов и смолисто-асфальтеновых веществ нефти Крапивинского месторождения.

Методы исследования: элементный анализ, жидкостно-адсорбционная хроматография, ИК-Фурье- и ПМР-спектроскопии, газовая хроматография-масс-спектрометрия.

Результаты. Установлено, что изученная нефть Крапивинского месторождения по своим физико-химическим характеристикам, структурно-групповому составу смол и асфальтенов, индивидуальному составу насыщенных углеводородов масляных компонентов и относительному распределению природных биомаркеров является типичным представителем верхнеюрских нефтей на территории Томской области. Она характеризуется средней плотностью, значительным количеством смолисто-асфальтеновых веществ и серы. Средние молекулы ее асфальтенов отличаются от средних молекул смол большим числом связанных воедино структурных блоков, большим размером их полиареновых ядер и меньшей средней длиной алифатических заместителей. В составе масляных компонентов присутствуют алканы нормального и разветвленного строения, алкилциклопентаны, алкилциклогексаны, прегнаны, диахолестаны, холестаны, хелайтаны и гопаны. Наличие в высоких концентрациях прегнанов C_{21} и C_{22} говорит о преимущественно морском типе исходного органического вещества. Присутствие максимума распределения *n*-алканов в низкомолекулярной области указывает на существенный вклад в исходное органическое вещество водорослевого материала. Повышенные значения отношения T_s/T_m свидетельствуют о том, что исследуемая нефть генерирована органическим веществом, накапливающимся в глинистых отложениях.

Ключевые слова:

Нефть, смолы, асфальтены, алканы, моно- и полициклоалканы, структурно-групповой анализ, распределение, состав.

Введение

Крапивинское нефтяное месторождение является одним из наиболее крупных месторождений Томской области, запасы которого оцениваются в 36,5 млн т [1]. Залежь приурочена к верхам васюганской свиты (горизонт Ю₁) в пределах юга Каймысовского свода (Каймысовский нефтегазоносный район) и активно эксплуатируется только с 2010 г. Для решения проблем, связанных с добычей, транспортировкой и переработкой данной нефти необходимо накопление информации об ее химиче-

ской природе и физико-химических свойствах. Особое значение имеют работы по изучению структуры молекул смол и асфальтенов и состава масел. Это связано с тем, что смолисто-асфальтеновые вещества (САВ) являются важным резервом углубленной переработки нефтяных систем [2–4], а масла – основой для производства товарных нефтепродуктов. САВ, кроме того, участвуют в образовании асфальтосмолопарафиновых отложений, снижающих эффективность процессов добычи и транспорта нефтей [5], а на основании данных об

индивидуальном составе углеводородов (УВ) масляных компонентов можно получить представление о процессах образования и условиях существования нефтяной залежи.

Целью настоящей работы является установление состава и строения масляных компонентов и смолисто-асфальтеновых веществ нефти Крапивинского месторождения.

Экспериментальная часть

Плотность определяли по ГОСТ 3900–85.

Для разделения нефти на асфальтены, смолы и масла использовали стандартную методику, которая соответствует ГОСТ 11858–66.

Экспериментальные данные получены на оборудовании центра коллективного пользования Томского научного центра.

Элементный состав образцов определяли с использованием CHNS-анализатора «Vario EL Cube».

Молекулярные массы компонентов измеряли методом криоскопии в бензоле по методике, описанной в [6].

ИК-спектры регистрировали с помощью FT-IR спектрометра «Nicolet 5700» в диапазоне 4000...400 см⁻¹. Образцы масел снимали в тонком слое. В случае смол анализировали пленки, полученные из раствора CHCl₃, в случае асфальтенов – таблетки с KBr.

Для описания молекулярной структуры выделенных асфальтенов и смол использовали метод структурно-группового анализа (СГА), разработанный в ИХН СО РАН [7, 8]. На основе данных о молекулярных массах, элементном составе нативных САВ и распределении протонов между различными фрагментами их молекул, установленном с помощью ЯМР ¹H-спектроскопии, рассчитывали средние структурные характеристики смол и асфальтенов нефти. При этом во внимание принималось допущение, что в их структуре содержится единый центральный полициклический ароматический блок. В ходе расчетов определены следующие параметры: 1) число углеродных атомов разного типа в средней молекуле: C_а, C_н, C_н – количество атомов С в ароматических, парафиновых и нафтеновых структурах, соответственно; C_α – количество атомов С, находящихся в α-положении к ароматическим ядрам и в не связанных с ароматическими ядрами терминальных метильных группах С_γ; 2) кольцевой состав: К_о, К_а, К_н – число общее, ароматических, нафтеновых циклов в средней молекуле; 3) m_а – число ароматических блоков в средней молекуле.

Спектры ЯМР ¹H получали с использованием ЯМР-Фурье спектрометра «AVANCE AV 300» фирмы Bruker при 300 МГц в растворах CDCl₃. Химические сдвиги приведены относительно тетраметилсилана при комнатной температуре. Относительное содержание протонов в различных структурных фрагментах определено по площади пиков сигналов в соответствующих областях спектра: H_{ар} (доля протонов, содержащихся в ароматических

структурах) – 6,6...8,5 м.д.; H_α (доля протонов у атома углерода в α-положении алифатических заместителей ароматических структур) – 2,2...4,0 м.д.; H_β и H_γ (доля протонов в метиленовых и в концевых метильных группах алифатических фрагментов молекул, соответственно) – 1,1...2,1 и 0,3...1,1 м.д. [9].

Состав УВ исследовали хромато-масс-спектрометрией с использованием DFS прибора «Thermo scientific». Газовый хроматограф с кварцевой капиллярной колонкой фирмы «Thermo Scientific» (внутренний диаметр 0,25 мм, длина 30 м, толщина фазы 0,25 мкм, неподвижная фаза – TR-5MS, газ-носитель – гелий). Температура испарителя – 250 °С, интерфейса – 250 °С. Программа нагрева термостата хроматографа: T_{нач} = 80 °С, изотерма в течение 2 мин, затем нагрев со скоростью 4 град/мин до T_{макс} = 300 °С. Метод ионизации – электронный удар, энергия ионизирующих электронов – 70 эВ; температура ионизационной камеры – 250 °С; диапазон регистрируемых масс – 50–500 а.е.м., длительность развертки спектра – 1 с. Обработку полученных результатов проводили с помощью программы Xcalibur. Идентификацию соединений выполняли с использованием литературных данных [10] и компьютерной библиотеки масс-спектров NIST 02, насчитывающей более 163 тыс. наименований. Относительную распространенность каждого гомолога внутри определенного класса соединений оценивали как отношение его содержания к суммарному содержанию всех гомологов этого класса.

Результаты и их обсуждение

Согласно общим характеристикам (табл. 1), исследуемая нефть Крапивинского месторождения является типичным представителем нефтей главной фазы нефтеобразования на территории Томской области. Она характеризуется средней плотностью, значительным количеством смолистых компонентов и серы [11].

Таблица 1. Характеристика нефти Крапивинского месторождения

Table 1. Characteristic of oil of Krapivinskoe oilfield

Тип нефти* Oil type*	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Содержание, мас. % Content, wt. %						
		C	H	N	S	асфальтены asphaltenes	смолы resins	масла oils
А (метано-нафтеновый) (methane-naphthene)	867	83,27	11,02	0,35	1,05	2,6	8,8	85,10

* по классификации Ал.А. Петрова [10].

* by classification of Al.A. Petrov [10].

Анализ ИК-спектров масел, смол и асфальтенов крапивинской нефти позволил получить ин-

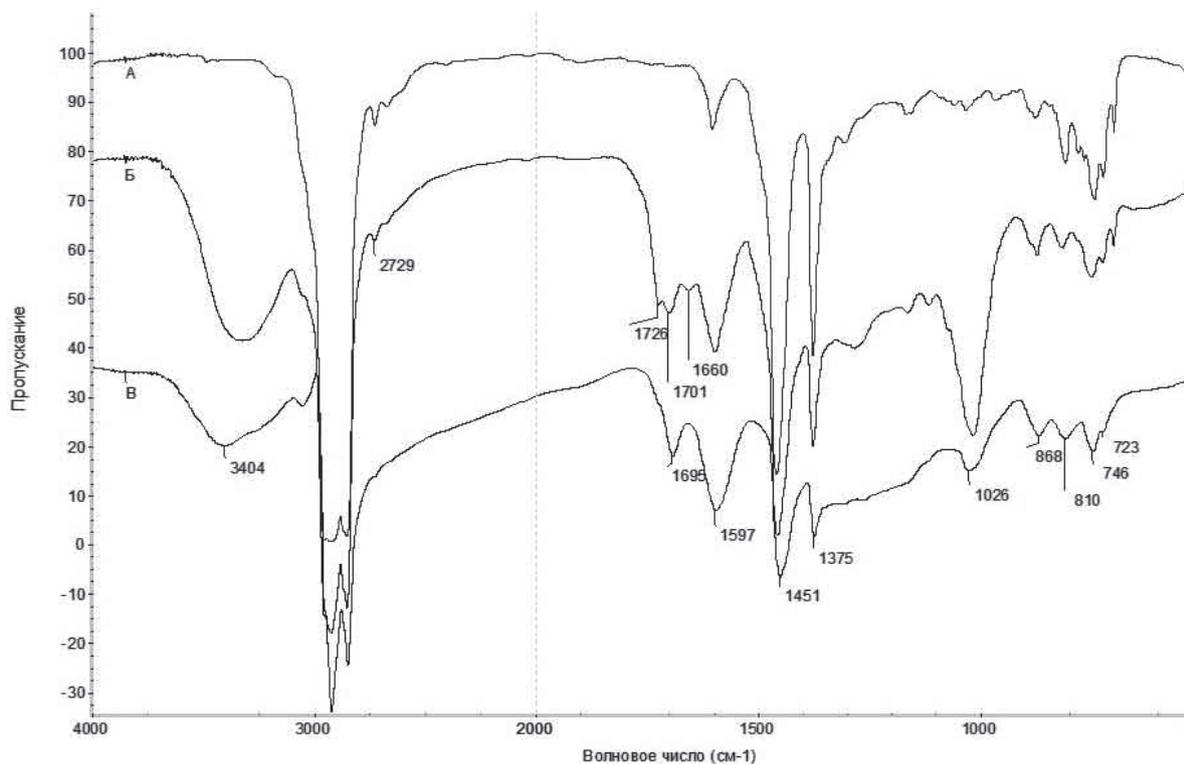


Рис. 1. ИК-спектры масел (А), смол (Б) и асфальтенов (В) нефти Крапивинского месторождения

Fig. 1. IR-spectra of oils (A), resins (B) and asphaltens (B) of oil in Krapivinskoe oilfield

формацию о качественном составе ее компонентов. Согласно полученным данным (рис. 1), для них характерно наличие высококонденсированных сильнозамещенных ароматических структур ($3030, 1598, 868...746 \text{ см}^{-1}$), в том числе с короткоцепочечными алкильными заместителями (723 см^{-1}), и насыщенных фрагментов ($2921, 2851, 1452, 1375 \text{ см}^{-1}$) [12]. Наиболее ярко полосы поглощения ароматических структур проявляются в ИК-спектре асфальтенов (рис. 1, В).

Особенностью ИК-спектров смол и асфальтенов (рис. 1, Б, В) является достаточно высокая интенсивность полос поглощения в области $3470...3430, 1730...1700$ и при 1026 см^{-1} , отвечающих колебаниям связей в функциональных группах О-Н, N-H, С=О, S=O. Это указывает на то, что фрагментами САВ могут быть фенолы, карбазолы, карбоновые кислоты и сульфоксиды. В ИК-спектре смол дополнительно проявляется полоса поглощения при 1660 см^{-1} , соответствующая колебаниям С-О-группы амидов. Хотя по данным элементного анализа в составе масел присутствуют сернистые ($S=1,04$), азотистые ($N=0,16$) и кислородсодержащие ($O_{\text{по разнице}}=1,75 \text{ мас. \%}$) соединения, в ИК-спектре масляных компонентов (рис. 1, А) четко фиксируется только полоса поглощения амидов (1660 см^{-1}).

Измеренные значения молекулярных масс асфальтенов значительно превышают значения молекулярных масс смол (табл. 2). В асфальтенах, по сравнению со смолами, выше содержание азота и ниже содержание серы и кислорода.

Для получения информации о химической природе смол и асфальтенов применяют метод СГА [13–15], позволяющий рассчитать среднее распределение атомов углерода между структурными элементами молекул САВ. Такое распределение дает представление о величине и строении молекул, составе и количестве различных структурных групп.

По данным СГА (табл. 2), средние молекулы асфальтенов содержат больше углеродных атомов (С), чем смолы, за счет большего количества этих атомов в ароматических (C_a) и нафтеновых (C_n) циклах. В средних молекулах асфальтенов они образуют два, а в средних молекулах смол – один структурный блок ($m_a=2,18$ и $1,21$, соответственно). Блоки представляют собой полициклические системы, в которых ароматические кольца сконденсированы с насыщенными [7, 8]. Структурные блоки в молекулах асфальтенов крупнее ($C^*=30$ углеродных атомов), чем в смолах ($C^*=25$ углеродных атомов). Повышенные габариты структурных блоков асфальтенов обусловлены их большей общей циклическостью ($K_o^*=7,87$). В структурный блок асфальтенов входит два или три ареновых ($K_a^*=2,78$) и пять насыщенных ($K_n^*=5,09$) колец. Структурный блок смол состоит из четырех циклов ($K_o^*=4,00$), два или три из которых приходится на насыщенное кольцо ($K_n^*=2,50$) и один или два – на ароматические ($K_a^*=1,50$). Вследствие больших размеров полиареновых ядер асфальтены характеризуются и более высокой, чем смолы, долей ароматического углерода ($f_a=39,19$ против $25,38 \text{ \%}$).

Таблица 2. Структурные параметры компонентов нефти Крапивинского месторождения

Table 2. Structural parameters of oil components in Krapivinskoe oilfield

Показатель Index	Компоненты Components	
	асфальтены asphaltenes	смолы resins
Средняя молекулярная масса, а.е.м. Average molecular mass, amu	940	480
Элементный состав, мас. % Elemental composition, wt. %	C	83,56
	H	7,62
	N	0,88
	S	2,39
	O	5,55
Число атомов в средней молекуле Amount of atoms in an average molecule	C	65,46
	C _α	25,65
	C _н	36,66
	C _п	3,15
	C _α	9,79
	C _γ	3,15
Кольцевой состав Annular composition	K _о	17,16
	K _а	6,06
	K _н	11,10
Число блоков в молекуле Amount of blocks in a molecule	m _а	2,18
Фактор ароматичности Aromaticity factor	f _а	39,19
Параметры средних структурных блоков Parameters of average structural blocks	K _о *	7,87
	K _а *	2,78
	K _н *	5,09
	C*	30,02
	C _а *	11,77
	C _н *	16,82
	C _п *	1,44
	C _α *	4,49
	C _γ *	1,44

* относится к структурной единице.

* refer to a structural unit.

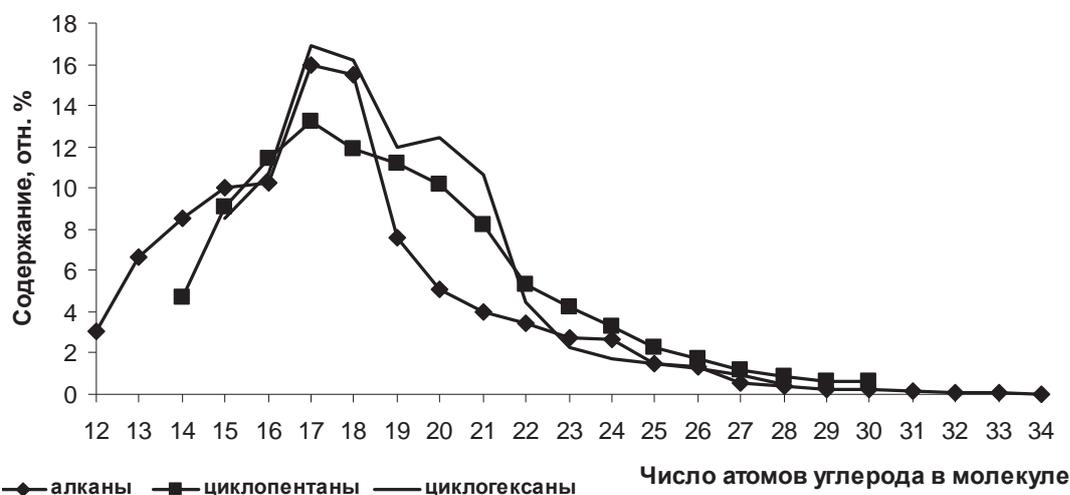


Рис. 2. Молекулярно-массовое распределение насыщенных УВ в маслах нефти Крапивинского месторождения

Fig. 2. Molecular-mass distribution of saturated hydrocarbons in oils of petroleum in Krapivinskoe oilfield

На долю алифатических фрагментов в структурных блоках асфальтенов приходится от одного до двух углеродных атомов ($C_n^*=1,44$), в то время как в смолах – от восьми до девяти ($C_n^*=8,48$). Алкильные заместители в структурном блоке асфальтенов представлены только метильными группами ($C_n^*=C_\gamma^*=1,44$). Относительное количество метильных групп в структурном блоке смол не превышает 23 % ($C_\gamma^*/C_n^*\cdot 100$). Большая часть парафиновых атомов углерода находится в длинных алкильных заместителях. Незначительная разница в значениях C_α^* (4,49 – для асфальтенов и 3,13 – для смол) может свидетельствовать о том, что в структурных блоках смол и асфальтенов практически равное количество алкильных (метильных) заместителей связано с ароматическими циклами. Результаты, отражающие структурные отличия асфальтенов от смол нефти Крапивинского месторождения, находятся в соответствии с данными, полученными для САВ из распространенных в Западной Сибири типов нефтей [8].

По данным хроматомасс-спектрометрического анализа масел большую часть УВ крапивинской нефти составляют насыщенные соединения. В их составе присутствуют алканы, моно- и полициклоалканы.

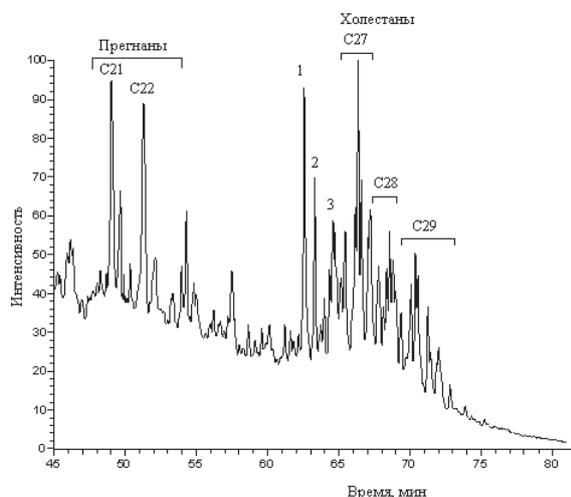
Среди алканов (m/z 57) идентифицированы гомологические ряды нормальных и разветвленных структур состава $C_{12}-C_{34}$ и $C_{13}-C_{27}$, соответственно.

Моноциклоалканы представлены циклопентанами (m/z 68) от C_{14} до C_{30} и циклогексанами (m/z 82,83) от C_{15} до C_{28} , полициклоалканы – стеранами (m/z 217) и терпанами (m/z 191).

Для установленных алканов и моноциклоалканов характерно унимодальное молекулярно-массовое распределение, с максимумами на C_{17} и C_{18} (рис. 2).

Среди стеранов (рис. 3) присутствуют C_{21} и C_{22} прегнаны, C_{27} , C_{28} диахолестаны с максимальным содержанием $13\beta(H), 17\alpha(H)$ -диахолестана (20S) и холестаны от C_{27} до C_{29} с максимумом на C_{27} . В со-

ставе терпанов (рис. 4) идентифицированы хелайтаны от C_{23} до C_{26} с максимумом на C_{23} и гопаны от C_{27} до C_{35} с максимумом на C_{30} .



- 1 – $13\beta(H),17\alpha(H)$ -Диахолестан ($20S$);
2 – $13\beta(H),17\alpha(H)$ -Диахолестан ($20R$);
3 – Дихолестан C_{28}

Рис. 3. Масс-фрагментограмма масел нефти Крапивинского месторождения по иону с m/z 217 (стераны)

Fig. 3. Mass fragmentogram of oils of petroleum in Krapivinskoe oilfield by an ion with m/z 217 (sterane)

Идентифицированные структуры характерны для нефтей из верхнеюрских отложений на территории Томской области [11].

На основании количественных соотношений УВ-биомаркеров различного строения и классов получены представления о некоторых процессах образования и условиях существования органического вещества (ОВ) и нефтяной залежи исследуемой нефти в высоких концентрациях прегнанов C_{21} и C_{22} (рис. 3) говорит о преимущественно морском типе исходного ОВ [16–18]. Присутствие максимума распределения n -алканов в низкомолекулярной области (рис. 2) указывает на существенный вклад в исходное ОВ водорослевого материала [19]. Повышенные значения отношения $T_s/T_m=1,17$ свидетельствуют о том, что исследуемая нефть генерирована ОВ, накапливающимся в глинистых отложениях [20]. Из распределения перечисленных выше соединений следует, что данная нефть сформировалась в главной фазе нефтеобразования [11].

Заключение

На основании изучения физико-химических свойств и химической природы компонентов нефти Крапивинского месторождения показано, что исследуемая нефть характеризуется средней плотностью (867 кг/м^3), значительным количеством

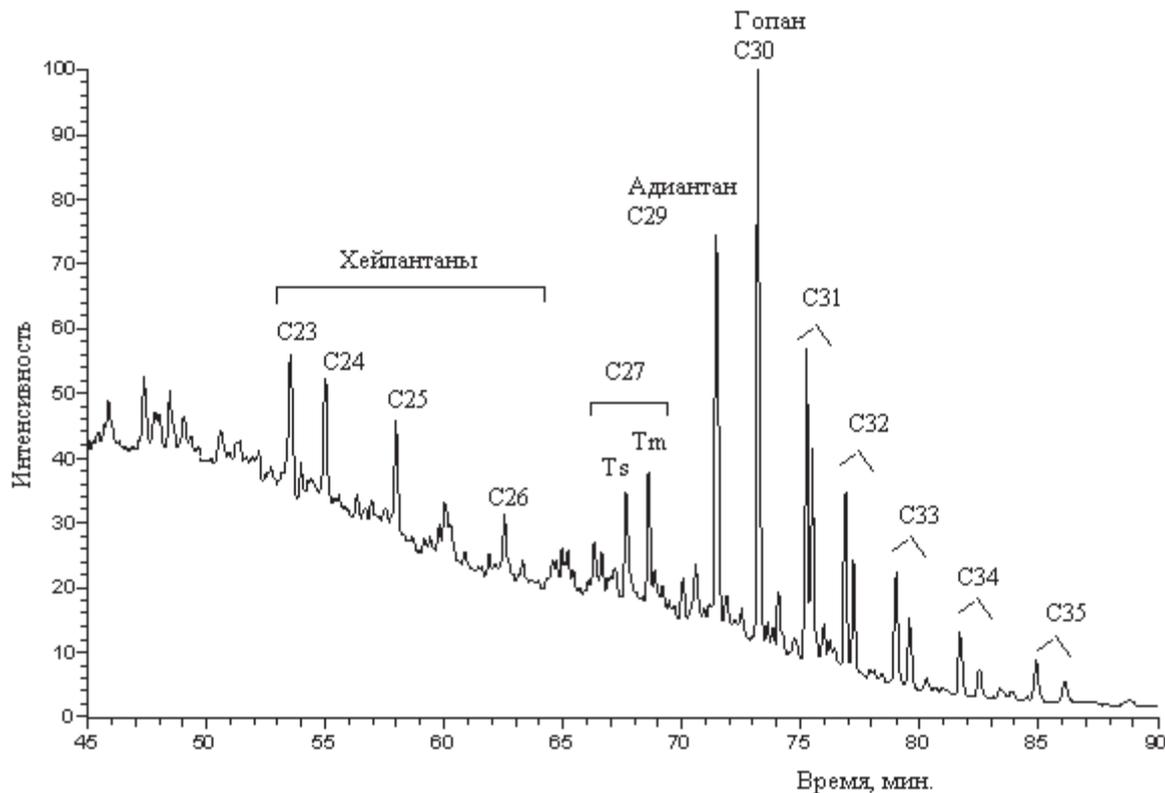


Рис. 4. Масс-фрагментограмма масел нефти Крапивинского месторождения по иону с m/z 191 (терпаны)

Fig. 4. Mass fragmentogram of oils of petroleum in Krapivinskoe oilfield by an ion with m/z 191 (terpanes)

САВ (11,4 мас. %) и серы (1,05 мас. %). Средние молекулы ее асфальтенов отличаются от средних молекул смол большим числом связанных воедино структурных блоков ($m_n=2,18$ и $1,21$, соответственно), большим размером их полиареновых ядер ($K_n^*=2,78$ и $1,50$, соответственно) и меньшей средней длиной алифатических заместителей ($C_n^*=1,44$ и $8,48$, соответственно). В составе масляных компонентов идентифицированы алканы и циклоалканы, представленные алканами нормального ($C_{12}-C_{34}$) и разветвленного ($C_{13}-C_{27}$) строения, алкилциклопентанами ($C_{14}-C_{30}$), алкилциклогексанами ($C_{15}-C_{28}$), прегнанами (C_{21} , C_{22}), диахолестанами (C_{27} , C_{28}), холестанами ($C_{27}-C_{29}$), хе-

лайтанами ($C_{23}-C_{26}$) и гопанами ($C_{27}-C_{35}$). Относительное распределение отдельных типов УВ-биомаркеров свидетельствует о том, что исследованная нефть генерирована ОБ морского происхождения и генетически связана с глинистыми материнскими породами.

Таким образом, нефть Крапивинского месторождения по своим физико-химическим характеристикам, структурно-групповому составу смол и асфальтенов, индивидуальному составу насыщенных УВ масляных компонентов и относительному распределению УВ-биомаркеров является типичным представителем верхнеюрских нефтей на территории Томской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Книга нефти: месторождения нефти и газа. URL: <http://kni-ganefti.ru/field.asp?field=38> (дата обращения: 05.09.2014).
2. Гринько А.А., Головки А.К. Исследование стабильности нефтяных асфальтенов методом термической деструкции // Химия в интересах устойчивого развития. – 2011. – Т. 19. – № 3. – С. 327–334.
3. Aromatic sulfur-containing structural units of resins and asphaltenes in heavy hydrocarbon feedstock / A.A. Grin'ko, R.S. Min, T.A. Sagachenko, A.K. Golovko // Petroleum Chemistry. – 2012. – V. 52. – № 4. – P. 221–227.
4. Antipenko V.R., Grin'ko A.A., Melenevskii V.N. Composition of products of analytical pyrolysis of resin and asphaltene fractions of Usa oil // Petroleum Chemistry. – 2014. – V. 54. – № 3. – P. 178–186.
5. Иванова Л.В., Бузов Е.А., Кошелев В.Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 1. – С. 268–284.
6. Современные методы исследования нефтей / под ред. А.И. Богомолова, М.Б. Темьянко, Л.И. Хотынцевой. – Л.: Недра, 1984. – 431 с.
7. Камьянов В.Ф., Большаков Г.Ф. Определение структурных параметров при структурно-групповом анализе компонентов нефти // Нефтехимия. – 1984. – Т. 24. – № 4. – С. 460–468.
8. Бейко О.А., Головки А.К., Горбунова Л.В. Химический состав нефтей Западной Сибири. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. – 288 с.
9. Огородников В.Д. ЯМР-спектроскопия как метод исследования химического состава нефтей // Инструментальные методы исследования нефти / под ред. Г.В. Иванова. – Новосибирск: Наука, 1987. – С. 49–67.
10. Петров Ал.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 264 с.
11. Стасова О.Ф., Ларичев А.И., Ларичкина Н.И. Типы нефтей юрских резервуаров юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Геология нефти и газа. – 1998. – № 7. – С. 4–11.
12. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия / пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
13. Golovko A.K., Gorbunova L.V., Kam'yanov V.F. The regularities in the structural group composition of high-molecular heteroatomic petroleum components // Russian Geology and Geophysics. – 2010. – V. 51. – № 3. – P. 286–295.
14. Thermal transformations of high-molecular-mass-components of heavy petroleum residues / M.A. Kopytov, A.K. Golovko, N.P. Kirik, A.G. Anshits // Petroleum Chemistry. – 2013. – V. 53. – № 1. – P. 14–19.
15. A study of structural transformations of asphaltene molecules during hydroconversion of vacuum residue at various temperatures in the presence of nanosized molybdenum disulfide particles / O.V. Zaytseva, E.E. Magomadov, Kh.M. Kadiev, E.A. Chernysheva, V.M. Kapustin, S.N. Khadzhiev // Petroleum Chemistry. – 2013. – V. 53. – № 5. – P. 309–322.
16. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker Guide. V. 1: Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History. V. 2: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History. 2nd ed. – Cambridge; New York; Melbourne: Cambridge University Press, 2005. – 1155 p.
17. Виноградова Т.Л., Пуланова С.А., Чахмачев В.А. Геохимические критерии литолого-фациальных условий накопления органического вещества и типов его исходной биомассы // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2002. – № 5. – С. 46–51.
18. Matveeva I.A., Petrov Al.A. Geochemical implications of $C_{21}-C_{22}$ steranes // Geochemistry International. – 1997. – № 4. – P. 398–402.
19. Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration, XVIII. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1978. – 538 p.
20. Органическая геохимия осадочной толщи и фундамента территории Татарстана / Г.П. Каюкова, Г.В. Романов, Р.Г. Лукьянова, Н.С. Шарипова. – М.: ГЕОС, 2009. – 487 с.

Поступила 15.09.2014 г.

UDC 665.613+617:550.84

CHEMICAL COMPOSITION OF PETROLEUM OF KRAPIVINSKOE OILFIELD

Altynay E. Torlomoeva,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, 634050,
Tomsk, Russia. E-mail: azot@ipc.tsc.ru

Tatyana V. Cheshkova,

Cand. Sc., Institute of petroleum chemistry, Russian academy of science,
Siberian branch, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia.
E-mail: chtv12@mail.ru

Elena Yu. Kovalenko,

Cand. Sc., Institute of petroleum chemistry, Russian academy of science,
Siberian branch, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia.
E-mail: azot@ipc.tsc.ru

Tatyana A. Sagachenko,

Dr. Sc., Institute of petroleum chemistry, Russian academy of science,
Siberian branch, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia.
E-mail: dissovets@ipc.tsc.ru

Relevance of the work is caused by the need to obtain the detailed information on hydrocarbon compositions and molecule structures of resin-asphaltene components in petroleum from Krapivinskoye oilfield to solve the problems arising at its production, transportation and processing and also for rational use of oil products.

The main aim of the study is to determine compositions and structures of oil components and asphaltene-resin substances in the petroleum from Krapivinskoye oilfield.

The methods used in the study: element analysis, the liquid and adsorptive chromatography, IR-Fourier- and proton magnetic resonance spectroscopy, gas chromatography-mass spectrometry.

The results. It was ascertained that by physicochemical characteristics, the structural-group composition of resins and asphaltenes, the individual composition of saturated hydrocarbons in oil components and relative distribution of natural biomarkers the petroleum from Krapivinskoye oilfield is a typical representative of crude oils of the main phase of oil generation in the territory of the Tomsk region. It has average density and large amounts of resin-asphaltene substances and sulfur. Average molecules of asphaltenes differ from average molecules of resins by a larger number of bound together structural blocks, larger size of their polycyclic nuclei and by smaller average length of the aliphatic substituents. Oil components contain alkanes of normal and branched structures, alkyl cyclopentanes, alkyl cyclohexanes, pregnanes, diacholestanes, cholestanes, chelaitanes and hopanes. Occurrence of pregnanes C_{21} and C_{22} at high concentrations indicates a predominant maritime type of the initial organic matter. The presence of *n*-alkanes distribution maximum in the low-molecular region indicates a substantial contribution of algal material to the initial organic matter. Higher values of T_s/T_m ratio suggests that the oil under study was generated by organic matter which had been accumulated in argillaceous sediments.

Key words:

Petroleum, resins, asphaltenes, alkanes, mono- and polycycloalkanes, group structure analysis, distribution, composition.

REFERENCES

1. *Kniga nefiti: mestorozhdeniya nefiti i gaza* [A book about oil: oil and gas fields]. Available at: <http://kniganefiti.ru/field.asp?field=38> (accessed: 05 September 2014).
2. Grinko A.A., Golovko A.K. Issledovanie stabilnosti neftyanykh asfaltenov metodom termicheskoy destruktzii [The investigation of oil asphaltenes stability with thermal destruction]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2011, vol. 19, no 3, pp. 327–334.
3. Grinko A.A., Min R.S., Sagachenko T.A., Golovko A.K. Aromatic sulfur-containing structural units of resins and asphaltenes in heavy hydrocarbon feedstock. *Petroleum Chemistry*, 2012, vol. 52, no. 4, pp. 221–227.
4. Antipenko V.R., Grin'ko A.A., Melenevskii V.N. Composition of products of analytical pyrolysis of resin and asphaltene fractions of Usa oil. *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 3, pp. 178–186.
5. Ivanova L.V., Burov E.A., Koshelev V.N. Asfaltosmoloparafino-vye otlozheniya v protsessakh dobychi, transporta i khraneniya [Asphalt-resin-wax sediments in production, transportation and storage]. *Neftegazovoe delo*, 2011, no. 1, pp. 268–284.
6. *Sovremennyye metody issledovaniya neftey* [A manual of modern oil investigation techniques]. Eds. A.I. Bogomolov, M.B. Temyanko, L.I. Khotyntseva. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 431 p.
7. Kamyanov V.F., Bolshakov G.F. Opredelenie strukturnykh parametrov pri strukturno-gruppovom analize komponentov nefiti [Determination of structural parameters in the structural and group analysis of petroleum components]. *Petroleum Chemistry*, 1984, vol. 24, no. 4, pp. 460–468.
8. Beyko O.A., Golovko A.K., Gorbunova L.V. *Khimicheskiy sostav neftey Zapadnoy Sibiri* [Chemical composition of oils in Western Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 288 p.
9. Ogorodnikov V.D. YaMR-spektroskopiya kak metod issledovaniya khimicheskogo sostava neftey [NMR spectroscopy as the method of studying chemical composition of crude oils]. *Instrumental'nye metody issledovaniya nefiti* [Instrumental procedures of testing oil]. Ed. by G.V. Ivanova. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. pp. 49–67.

10. Petrov A.A. *Uglevodorody nefiti* [Petroleum hydrocarbons]. Moscow: Nauka, 1984, 264 p.
11. Stasova O.F., Larichev A.I., Larichkina N.I. Tipy neftey yurskikh rezervuarov yugo-vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskoy plityi [Types of oils from Jurassic reservoirs in the south-east of West Siberian plate]. *Geologiya nefiti i gaza*, 1998, no. 7. pp. 4–11.
12. Smit A. *Prikladnaya IK-spektroskopiya* [Applied infrared spectroscopy]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1982. 328 p.
13. Golovko A.K., Gorbunova L.V., Kam'yanov V.F. The regularities in the structural group composition of high-molecular heteroatomic petroleum components. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 3, pp. 286–295.
14. Kopytov M.A., Golovko A.K., Kirik N.P., Anshits A.G. Thermal transformations of high-molecular-mass-components of heavy petroleum residues. *Petroleum Chemistry*, 2013, vol. 53, no. 1, pp. 14–19.
15. Zaytseva O.V., Magomadov E.E., Kadiev Kh.M., Chernysheva E.A., Kapustin V.M., Khadzhiev S.N. A study of structural transformations of asphaltene molecules during hydroconversion of vacuum residue at various temperatures in the presence of nanosized molybdenum disulfide particles. *Petroleum Chemistry*, 2013, vol. 53, no. 5, pp. 309–322.
16. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. *The Biomarker Guide*. Vol. 1: Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History. Vol. 2: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History. Second Edition. Cambridge; New York; Melbourne, Cambridge University Press, 2005. 1132 p.
17. Vinogradova T.L., Punanova S.A., Chakhmachev V.A. Geokhimicheskie kriterii litologo-fatsialnykh usloviy nakopleniya organicheskogo veshchestva i tipov ego iskhodnoy biomassy [Geochemical criteria of lithological-facial conditions for accumulation of organic matter and types of its initial biomass]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2002, no. 5, pp. 46–51.
18. Matveeva I.A., Petrov A.I.A. Geochemical Implications of C₂₁–C₂₂ Steranes. *Geochemistry International*, 1997, no. 4, pp. 398–402.
19. Tissot B.P., Welte D.H. *Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration, XVIII*. Berlin; Heidelberg; New York, Springer-Verlag, 1978. 538 p.
20. Kayukova G.P., Romanov G.V. Lukyanova R.G., Sharipova N.S. *Organicheskaya geokhimiya osadochnoy tolshchi i fundamenta territorii Tatarstana* [Organic geochemistry of sedimentary strata and basement in Tatarstan]. Moscow, GEOS Publ., 2009. 487 p.

Received: 15 September 2014.

УДК 556,3

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМОСТЬ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СРЕДЫ КАК ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЗУЧЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ

Трушкин Валерий Владимирович,

канд. геол.-минерал. наук, начальник отдела оперативного подсчета запасов нефти и газа ОАО «ТомскНИПИнефть», Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72. E-mail: TrushkinVV@nipineft.tomsk.ru

Актуальность работы. Идея, что геология является не прикладной наукой, а фундаментальной, имеющей собственные законы развития Земли, была высказана еще Ф. Энгельсом, в дальнейшем развивалась советскими учеными Б.М. Кедровым, С.Л. Шварцевым, Е.В. Пиннекером и др. Во второй половине XX столетия В.П. Савченко и М.К. Хаббертом была разработана методика гидродинамического картирования ловушек и залежей нефти и газа. Методика основывалась на гидродинамическом уравнении Д. Бернулли. В 1991 г. для уточнения границ Первомайского месторождения нефти автором была предпринята попытка использовать термодинамическое уравнение Д. Бернулли. Для этого была рассчитана удельная теплоемкость воды для пластовых условий Первомайского месторождения, но при картировании его границ с использованием этой величины был получен отрицательный результат. Затем, используя законы первого и второго начал термодинамики, была выведена усложненная формула расчета этой величины, которая оказалась в четыре раза меньше, но ее применение дало положительный результат. Расчетные границы Первомайского месторождения совпали с фактическими границами. В 2000 г. эта величина была названа удельной теплоемкостью пластовой воды, а причина ее снижения в четыре раза объяснялась с точки зрения прикладной науки увеличением молярной массы физически связанной пластовой воды. Но данная точка зрения не объясняла математического парадокса получения положительного результата при усложнении формулы расчета теплоемкости.

Цель работы: дать логическое объяснение математического парадокса вывода формулы удельной теплоемкости воды с позиции фундаментальной идеи геологической формы движения воды.

Метод исследования. Для доказательства возможности применения данной фундаментальной идеи используется подход Е.В. Пиннекера, который впервые, по сути, предложил рассматривать гидрогеологию не просто как прикладную науку о подземных водах, а как фундаментальную науку о подземной гидросфере.

Результаты. На примере Первомайского месторождения установлено, что выведенная формула расчета удельной теплоемкости зависит не только от параметров воды, но и от мольного объема фильтрационной среды, который в четыре раза больше мольного объема воды. Рассмотренное современное определение теплоемкости совпадает по физической и механической сути с процессом ползучести тел. А установленная зависимость рассмотренной удельной теплоемкости от мольного объема фильтрационной среды и совпадение ее с аналогичной геологической сутью процесса ползучей фильтрации воды позволили обосновать новое название этой величины – удельная теплоемкость фильтрационной среды.

Вывод. Выведенная в 1991 г. формула расчета удельной теплоемкости фильтрационной среды может рассматриваться как фундаментальная закономерность более высокого уровня организации материи – геологической формы движения воды, которая является температурным коэффициентом, характеризующим ползучую фильтрацию воды.

Ключевые слова:

Удельная теплоемкость, геологическая форма движения воды, нефтяная залежь, парадокс, система вода–порода, молярный объем и масса.

Ведущая роль движения подземных вод в формировании, сохранении и разрушении залежей нефти и газа признается многими исследователями. Однако в настоящее время данный фактор слабо используется при поисково-разведочных работах. Залежи с наклонными контактами известны давно не только в замкнутых, но и в незамкнутых структурах (структурные носы и террасы) (Ф. Клапп, 1929 и И.М. Губкин, 1932). Впервые теоретически обосновал возможность существования таких залежей с гидродинамических позиций В.П. Савченко [1, 2]. Аналогичные гидродинамические залежи были подробно обчислены американским исследователем М.К. Хаббертом [3–5] на основе разработанной им методики гидродинамического картирования ловушек и залежей нефти и газа, которая явилась одним из наиболее крупных достижений поисковой гидрогеологии второй половины XX столетия. Введя в науку понятие «потенциальной энергии пластовых флюидов», М.К. Хабберт показал возможность поиска залежей нефти и вне структурных условий, включая синклиналильные прогибы.

В 1991 г. при пересчете запасов Первомайского месторождения нефти была закартирована его граница гидродинамическим методом [6]. Граница хоть и проходила параллельно установленной, но площади различались на 7 %. По данным А.Е. Гуревича [7], эта величина достигала 25 %.

В этой связи были предприняты попытки уточнить границы месторождения с учетом кинетической и тепловой энергии флюидов [8, 9]. Из-за низкой скорости фильтрации воды влияние кинетической энергии на границы месторождения оказалось пренебрежимо малым. Для расчета тепловой энергии определялась удельная теплоемкость воды.

В стандартных условиях удельная теплоемкость воды равна 1 ккал/(кг·К) или 4,1868 кДж/(кг·К)

$$c_p = \frac{C_p}{\mu}, \quad (1)$$

где C_p – изобарная теплоемкость воды, 75,37 Дж/(моль·К); μ – молярная масса воды, 18 г/моль.

Для пластовых условий Первомайского месторождения рассчитанная по таблицам теплофизических свойств воды [10] она составила 4,1488–4,1660 кДж/(кг·К) [6]. Использование данных величин при картировании границ месторождения дало отрицательный результат.

Используя законы первого и второго начал термодинамики, была выведена более сложная формула расчета удельной изобарной теплоемкости неизвестной среды c_p^Φ , в зависимости от других параметров воды:

$$c_p^\Phi = \frac{c_p P_{пл} v^2}{T_{пл} K a^2 v_0^2}. \quad (2)$$

где c_p – удельная изобарная теплоёмкость воды; $T_{пл}$ – пластовая температура; $P_{пл}$ – пластовое давление; a – температурный коэффициент объёмного расширения воды при постоянном давлении; K – изотермический модуль объёмного сжатия воды; v – удельный объём воды; v_0 – начальный удельный объём воды.

Рассчитанные по этой формуле значения снизились в четыре раза, составив 0,952–1,074 кДж/(кг·К). В этом случае закартированные границы Первомайского месторождения совпали с фактическими границами по основной его части [6]. При данных значениях удельной теплоемкости молярная масса, согласно формуле (1), в среднем составила 74,6 г/моль.

Причина увеличения молярной массы в четыре раза в работе [6] связывалась с высокой молярной массой физически связанной воды 190 ± 80 г/моль, содержание которой в пластовой воде может составлять 33 %. Тогда в сумме со свободной водой молярная масса также составит

$$\mu_{пл.в.} = 190 \cdot 0,33 + 18 \cdot 0,67 = 74,6 \text{ г/моль.}$$

При этом в расчетах величина молярной массы связанной воды взята по аналогии с водой II, открытой Н.Н. Федякиным и Б.В. Дерягиным (1962). При конденсации паров воды в кварцевых капиллярах (диаметром 5–20 мкм) ими было обнаружено явление резкого изменения ее свойств. Вязкость увеличивалась с $1 \cdot 10^2$ до $16,5\text{--}22 \cdot 10^2$ пз, плотность с 1 до $1,4$ г/см³. Температура кипения составляла около 300 °С. При –40 °С она переходила в стекловидное состояние. Молярная масса увеличилась с 18 до 295 г/моль [11].

Возможность образования воды II в тонких капиллярах и явилась основным аргументом приравнивания некоторыми исследователями ее свойств к свойствам физически связанной воды [12]. Однако, по мнению Б.В. Дерягина [11], вода II действительно может образовываться в глинах, но в необычных условиях. Проведенные им исследования показали, что она образовывалась в условиях резкого колебания недонасыщения и перенасыщения парами воды на поверхности гидрофильной пластинки (не обязательно в капиллярах). При наложении на пластинку очень тонких пленок воды она не образовывалась. Также неоднозначно к этому вопросу подходят В.А. Кирюхин, А.И. Корот-

ков, А.Н. Павлов [13], считая, что пока трудно определить роль воды II в природных системах, но ясно, что ее исследование сулит определенные перспективы в изучении глубинных геологических процессов.

Таким образом, использование молярной массы воды II для объяснения низкой величины удельной теплоемкости вызывает сомнение. Но главное, данный подход не объясняет парадокса полученного положительного результата при использовании формулы (2), при ее усложнении. Суть его в следующем: по правилам математики, при превращении выражения из простого в сложное должен получиться прежний результат. Например, в известном математическом выражении $2 \cdot 2 = 4$, если заменить двойки выражениями $(5-3) \cdot 6/3 = 4$, те, в свою очередь, на другие и т. д., в конечном итоге мы все равно не получим пять. Мы же из ≈ 4 получили ≈ 1 .

В данной работе рассматривается вторая точка зрения, объясняющая этот парадокс с позиции идеи геологической формы движения воды (ГФДВ). Идея ГФДВ, как важнейшая составляющая геологической формы движения материи (ГФДМ), впервые была рассмотрена С.Л. Шварцевым и Е.В. Пиннекером [14]. ГФДМ, обоснованная Ф. Энгельсом, явилась результатом несостоятельности объяснения всех форм развития (движения) геологических систем механическими и физическими явлениями, а всех закономерностей – физическими или физико-химическими [15]. В этой связи С.Л. Шварцев также отмечал, что ГФДВ не механическая сумма более простых форм, а качественно новая форма, имеющая собственные законы движения и развития, пока еще, правда, недостаточно изученная. В то же время он предполагал, что ГФДВ – это *специфическая* ФДВ, которая включает в себя не только простые формы (механическую, физическую, химическую), но и более сложные (биологическую, техногенную или ноосферную). В результате терялась методология познания этих законов, не позволявшая объяснить причину положительного результата усложненной формулы (2).

Ф. Энгельс трактовал геологию «не как науку о какой-либо *специфической* форме движения, а как науку о реальных предпосылках для возникновения высших форм движения (жизни)» [15]. ГФДМ образовалась как результат развития материи из низших форм движения в высшие. Они следуют в том же порядке: механическое, физическое, химическое, геологическое и биологическое движение. Используя данную иерархию, Ф. Энгельс сформулировал идею единства этих форм движения с законами, управляющими ими. ГФДМ имеет более универсальные законы и включает в себя законы механики, физики и химии. Биогенные системы, в свою очередь, унаследовали в процессе эволюции законы ГФДМ, важнейшими из которых являются законы ГФДВ, познание которых, как считает ряд исследователей, возможно и позволит раскрыть

суть становления Жизни на Земле. Развивая эту методологию, Р.Ф. Абдеев писал: «Закономерности высших уровней развития материи, так или иначе, включают в себя закономерности низших уровней, но отнюдь не сводятся к ним» [16]. Исходя из этого определения формулу (2) можно рассматривать как закономерность ГФДВ, которая включает в себя законы физической ФДВ (первого и второго начал термодинамики), но не сводится к определению удельной теплоёмкости воды.

Таким образом, подход к изучению парадокса положительного результата, полученного при усложнении формулы расчета удельной теплоемкости (2) с позиции ГФДВ, позволяет объяснить его, если рассматривать формулу (2) как закономерность ГФДВ. Теперь выясним, к чему еще сводится данная закономерность.

По Е.В. Пиннекеру [14], новый подход к изучению гидрогеологии как науки о подземной гидросфере заключается в изменении тенденции исследования к познанию водообмена и массопереноса целиком для подземной гидросферы, а не для отдельного, пусть даже и ведущего, ее компонента – воды. Впервые такой подход в изучении движения глубоких вод начал доказывать и практически применять А.А. Граусман [17]. Необходимость такого подхода видна при анализе параметров в формуле (2), где шесть параметров характеризуют воду и только пластовая температура является функцией состояния системы вода–порода. Поскольку тепловые процессы не могут происходить отдельно в воде и в породе, в соответствии с данным подходом было подмечено, что молярная масса 74,6 г/моль при приравнивании формул (1) и (2) в 2,43 раза ниже молярной массы пласта 176,9 г/моль Первомайского месторождения, что можно представить в следующем виде:

$$\mu = \mu_{\text{пл}} p / p_{\text{п}} = V_{\text{пл}} p, \quad (3)$$

где $\mu_{\text{пл}}$ – молярная масса пласта, г/моль; p – плотность воды, 1 г/см³; $p_{\text{п}}$ – плотность породы, 2,43 г/см³; $V_{\text{пл}}$ – молярный объём пласта, см³/моль.

Согласно выражению, молярный объём продуктивного пласта Первомайского месторождения должен составить 74,6 см³/моль.

Исходя из среднего процентного содержания минералов в породе: кварца 38 %, полевых шпатов 34 %, каолинит-гидрослюдистого цемента 13 % и воды (принято равным проценту пористости) 15 % сделан непосредственный расчет приведённых величин.

Молярная масса рассчитывалась путем суммирования отдельных химических элементов, взятых из таблицы Д.И. Менделеева: кварц SiO₂ – 60; полевые шпаты – 275 (микроклин и санидин K (AlSi₃O₈) – 278, олигоклаз (Ca_{0,2}Na_{0,8}) (Al_{1,2}Si_{2,8}O₈) – 280, альбит – 262, анортит – 278); каолинит-гидрослюдистый цемент – 440 (каолин, диккит, галлуазит Al₄(Si₄O₁₀)(OH)₈ – 516, аноксит – 420–516, гидробиотит – 361–429, гидромусковит – 378–400); вода H₂O – 18.

Молярные объёмы брались из таблицы физических свойств минералов [18]: кварц – 23 (*a*-кварц – 22,29; *b*-кварц – 23,72); полевые шпаты – 106 (микроклин – 108,69; санидин – 108,98; альбита – 100,2; анортита – 100,73); каолинит-гидрослюдистый цемент – 184,3 (диккит – 198,62, флогопит – 146,38, мусковит – 140,55); вода – 18.

Сделанные непосредственные расчеты молярной массы 176,1 г/моль и объёма пласта 71,4 см³/моль Первомайского месторождения нефти практически совпадают с расчетами, сделанными на основе формулы (3), подтверждая предположения зависимости молярной массы среды от параметров системы вода–порода.

Исходя из чего, подставив формулу (3) в формулу (1), получим

$$c_p^{\text{ф}} = (C_p/p)V_{\text{пл}} = c_p(V/V_{\text{пл}}), \quad (4)$$

которая наглядно показывает, к чему еще сводится закономерность (2). Удельная теплоёмкость зависит от объёма фильтрационной среды. Поэтому рассчитываемую по формулам (2) и (4) величину назовем удельной теплоемкостью фильтрационной среды, которая характеризует ГФДВ, не сводящуюся к механической сумме удельных теплоемкостей отдельных ее минералов. Соответственно для сплошных сред, например воды, зависимость (4) будет сводиться к зависимости удельной теплоемкости воды, характеризующей физическую ФДВ:

$$c_p = (C_p/p)V = c_p(V/V).$$

Теперь принципиально важно понять, что характеризует удельная теплоемкость фильтрационной среды. Прежде всего, необходимо напомнить суть понятия теплоёмкости. До настоящего времени иногда бытуют неправильные представления о смысле этого термина, основанного не на определении данного в современной термодинамике, а на ассоциации этого термина, полученного наукой в наследство от теории теплорода, с «неким объёмом» вещества при увеличении температуры. Согласно современному определению, под теплоемкостью тела понимается отношение бесконечно малого приращения внутренней энергии и производства работы по температурному расширению тела к соответствующему приращению его температуры [19].

При изучении скорости фильтрации подземных вод при градиенте напора ниже начального в работе [6] было установлено, что геологическая суть этой проблемы кроется в физической проблеме разграничения жидких и аморфно-твердых тел, свойств текучести и ползучести. В современной физике отсутствовала классическая теория, объясняющая физическую сущность ползучести тел. Используя классическую молекулярную модель упругости тел, было показано, что при воздействии на воду силы, превышающей силу ее упругости, она будет проявлять свойство обычной жидкости – текучесть, в обратном случае вода будет относиться к типу неньютоновской, максвелловской,

аномальной жидкости, проявляющей свойство твердого тела – ползучесть.

Исходя из данной модели, было обосновано два вида фильтрации: текучая, происходящая по закону Дарси, и ползучая, происходящая при градиенте напора ниже начального (нижний предел применимости закона Дарси). Под силой начального градиента напора принята сила упругости воды, которая резко возрастает в связанной со стенками пор воде. Также в этой работе [6] впервые с классических позиций было дано объяснение физической сущности процесса ползучести, которая проявляется в явлениях генерации тепла и теплопроводности. Механическая сущность вязкоупругого сдвига, характеризующего ползучесть, заключается в однонаправленном упругом сжатии и температурном расширении тела. Это позволяет сделать вывод, что представленное выше определение теплоёмкости совпадает по физической и механической сути с процессом ползучести тел.

Принципиально важным моментом данного определения является то, что теплоёмкость, в соответствии с законом сохранения энергии, не есть функция состояния тела, как то: объём, температура, давление (согласно существовавшей теории теплорода), а является характеристикой бесконечно малого процесса. Наиболее простыми характеристиками бесконечно малых процессов в современной термодинамике являются температурный коэффициент объёмного расширения α , изотермический модуль объёмного сжатия K и температурный коэффициент давления β . Поэтому термин теплоёмкость, полученный нами в наследство от теории теплорода, рациональнее было бы заменить

термином типа температурный коэффициент увеличения внутренней энергии и объёма тела (при изменении его температуры на один градус). Однако, как отмечает Д.В. Сивухин [19], особой бедой в этом нет, если термин теплоёмкость понимать в смысле точного его определения.

Наиболее полно сделанный выше вывод раскрывается в формуле (2), где тождества, описывающие бесконечно малые процессы: изотермический модуль объёмного сжатия и температурный коэффициент объёмного расширения, количественно отражают механическую сущность ползучести тел [6]. Определение геологической сути зависимости (2) воды в системе с породой показало ее связь с молярным объёмом пласта (5). При исследовании фильтрационной ползучести воды через коллектор [6] было установлено, что ее геологическая суть также заключается в участии в этом тепловом движении всего объёма пласта. Исходя из этого, можно сказать, что удельная теплоёмкость фильтрационной среды является температурным коэффициентом, характеризующим ползучую фильтрацию воды.

Вывод

Таким образом, в 1991 г. была выведена формула расчета удельной теплоёмкости фильтрационной среды в зависимости от параметров воды (2). Данная формула может рассматриваться как **закономерность** более высокого уровня организации материи – геологической формы движения воды, характеризующая температурный коэффициент ползучей фильтрации воды в глубоких нефтегазоносных горизонтах земной коры [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савченко В.П. Смещение газовых и нефтяных залежей // Нефть. хоз-во. – 1952. – № 12. – С. 22–26.
2. Савченко В.П. Смещение газовых и нефтяных залежей // Нефть. хоз-во. – 1953. – № 1. – С. 36–41.
3. Hubbert M.K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. – 1953. – V. 37. – № 8. – P. 1954–2026.
4. Hubbert M.K. The theory of ground-water motion // J. Geology. – 1940. – V. 48. – P. 785–944.
5. Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting (I) // Bull. Geol. Soc. Amer. – 1959. – V. 70. – № 2. – P. 115–166.
6. Трушкин В.В. Исследование характера движения пластовых вод нефтегазоносных отложений Томской области (на примере Игольско-Талового и Карайского месторождений нефти): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2000. – 135 с.
7. Гуревич А.Е. Процессы миграции подземных вод, нефтей и газов. – Л.: Недра, 1969. – 110 с.
8. Barker C. Aquathermal pressuring – role of temperatures in development of abnormal pressure zones // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. – 1972. – V. 56. – № 10. – P. 2068–2071.
9. Трушкин В.В. О роли системы вода-порода в формировании теплового поля земной коры на примере Западно-Сибирского мегабассейна // Геологическая эволюция взаимодействия воды и с горными породами: Матер. Всерос. конф. с участием иностр. ученых. – Томск: Изд. НТЛ, 2012. – С. 359–364.
10. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров Л.А. Таблицы теплотехнических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.
11. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Новые свойства жидкостей. – М.: Наука, 1971. – 176 с.
12. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. – М.: Недра, 1996. – 423 с.
13. Кирюхин В.А., Коротков А.И., Павлов А.Н. Общая гидрогеология. – Л.: Недра, 1988. – 359 с.
14. Основы гидрогеологии. В 6-ти т. Т. I. Общая гидрогеология / отв. ред. Е.В. Пиннекер. – Новосибирск: Наука, 1980. – 225 с.
15. Кедров Б.М. Классификация наук. I. Энгельс и его предшественники. – М.: ВПШ и АОШ при ЦК КПСС, 1961. – 471 с.
16. Абдеев Р.Ф. Философия информационной цивилизации. – М.: Владос, 1996. – 356 с.
17. Граусман А.А., Граусман В.В., Дыбина Н.А. Геогидродинамические системы, вопросы их эволюции и моделирования на ЭВМ. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1995. – 84 с.
18. Булах А.Г., Булах К.Г. Физико-химические свойства минералов и компонентов гидротермальных растворов. – М.: Недра, 1978. – 167 с.
19. Сивухин Д.В. Термодинамика и молекулярная физика. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 592 с.
20. Трушкин В.В. Флюидодинамическая парадигма нефтяной геологии XXI века // Недропользование XXI век. – 2014. – № 1. – С. 78–83.

Поступила 04.12.2013 г.

UDC 556,3

SPECIFIC HEAT CAPACITY OF FILTER MEDIUM AS A PARAMETER OF WATER CREEPING FILTRATION

Valeriy V. Trushkin,

Cand. Sc., JSC TomskNIPIneft, 72, Mir Avenue, Tomsk, 634027, Russia.

E-mail: TrushkinVV@nipineft.tomsk.ru

Relevance of the research. The idea that geology is not the applied science but the fundamental one with its proper laws of the Earth development was stated by F. Engels. This concept was furthered by such Russian scientists as B.M. Kedrov, S.L. Shvartsev, E.V. Penneker. In the second half of XX century V.P. Savchenko and M.K. Hubbert developed the hydrodynamic technique for mapping oil and gas traps and accumulation. The technique was based on hydrodynamic equation of D. Bernoulli. In 1991 the author used the first and the second laws of thermodynamics to specify the boundaries of Pervomayskoye oilfield and derived the formula to calculate the specific heat capacity of environment by water parameters. Its value was four times lower than that for ordinary water. The calculated boundaries of Pervomayskoye oilfield coincided with real boundaries. In 2000 this value was called specific heat capacity of formation water. The decrease in this value was explained by the applied science by the increased molar mass of physically bound formation water. But this point of view did not explain the mathematical paradox of obtaining positive result when complicating the formula for calculating specific heat capacity.

The main aim of the study is to explain the paradox of obtaining the formula for calculating specific heat capacity from the point of view of fundamental idea of geological mode of water motion.

The method used in the study. To prove the possibility of applying this fundamental idea the author used the approach of E.V. Penneker. The latter was the first who proposed to consider hydrogeology not simply as the science of formation waters but as the applied science of subsurface hydrosphere.

The results. Using a systematic approach, the author explains the geological cause of the decline of this value and specifies its name – specific heat capacity of filter medium. The paper contains calculations to prove this approach as well. From the viewpoint of the physical nature of creep properties of solid bodies previously substantiated by the author and the modern definition of specific heat capacity, the author shows that this value is a parameter of the creeping filtration of water.

Conclusion. The formula for calculating specific heat capacity of filter medium deduced in 1991 can be considered as the fundamental regularity of higher level of matter organization – the geological mode of water movement which is the temperature coefficient characterizing creeping water filtration.

Key words:

Specific heat capacity, water movement mode, oil deposit, paradox, water–rock system, molar volume and weight.

REFERENCES

- Savchenko V.P. Smeshchenie gazovykh i neftyanykh zalezhey [Shift of oil and gas accumulations]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 1952, no. 12, pp. 22–26.
- Savchenko V.P. Smeshchenie gazovykh i neftyanykh zalezhey [Shift of oil and gas accumulations]. *Neftyanoe khozyaistvo*, 1953, no. 1, pp. 36–41.
- Hubbert M.K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 1953, vol. 37, no. 8. pp. 1954–2026.
- Hubbert M.K. The theory of ground-water motion. *J. Geology*, 1940, vol. 48, pp. 785–944.
- Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting (I). *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1959, vol. 70, no. 2, pp. 115–166.
- Trushkin V.V. Issledovanie kharaktera dvizheniya plastovykh vod neftegazonosnykh otlozheny Tomskoy oblasti (na primere Igolsko-Talovogo i Karayskogo mestorozhdeniy nefi). Diss. Kand. nauk [Research of the character of formation water motion in oil-and-gas bearing deposits in Tomsk region (by the example of Igolsko-Talovskoe and Karayskoe oil fields). Cand. Diss.]. Tomsk, 2000. 135 p.
- Gurevich A.E. Protsesty migratsii podzemnykh vod, neftey i gazov [Migration of formation waters, oils and gases]. Leningrad, Nedra Publ., 1969. 110 p.
- Barker C. Aquathermal pressuring – role of temperatures in development of abnormal pressure zones. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 1972, vol. 56, no. 10, pp. 2068–2071.
- Trushkin V.V. O roli sistemy voda–poroda v formirovaniy teplovogo polya zemnoy kory na primere Zapadno-Sibirskogo megabassayna [The role of water–rock system in formation of thermal field of the Earth crust by the example of Western Siberian megabassin]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh. Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami* [Proc. of All-Russian conference with participation of foreign scientists. Geological evolution of water–rock interaction]. Tomsk, NTL Publ., 2012. pp. 359–364.
- Vukalovich M.P., Rivkin S.L., Aleksandrov L.A. Tablitsy teplofizicheskikh svoystv vody i vodyanogo para [Tables of thermal physical properties of water and vapor]. Moscow, Izd. standartov, 1969. 408 p.
- Deryagin B.V., Churaev N.V. *Novye svoystva zhidkostey* [New properties of liquid]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1969. 176 p.
- Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1996. 423 p.
- Kiryukhin V.A., Korotkov A.I., Pavlov A.N. *Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Leningrad, Nedra Publ., 1988. 359 p.
- Osnovy gidrogeologii. Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Ed. E.V. Pinniker. Novosibirsk, Nedra Publ., 1980. Vol. 1, 225 p.
- Kedrov B.M. *Klassifikatsiya nauk. I. Engels i ego predshestvenniki* [Science classification. I. Engels and his predecessors]. Moscow, VPSH i AOSH pri TSK KPSS Press, 1961. 471 p.
- Abdeev R.F. *Filosofiya informatsionnoy tsvivilizatsii* [Philosophy of information civilization]. Moscow, Vldos Publ., 1996. 356 p.
- Grausman A.A., Grausman V.V., Dybina N.A. *Geoidrodinamicheskie sistemy, voprosy ikh evolyutsii i modelirovaniya na EVM* [Geohydrodynamic systems issues of their evolution and simulation]. Yakutsk, YANTS SO RAN Press, 1995. 84 p.
- Bulakh A.G., Bulakh K.G. *Fiziko-khimicheskie svoystva mineralov i komponentov gidrotermalnykh rastvorov* [Physical and chemical properties of minerals and components of hydrothermal solutions]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 167 p.
- Sivukhin D.V. *Termodinamika i molekulyarnaya fizika* [Thermodynamic and molecular physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 592 p.
- Trushkin V.V. Flyuidodinamicheskaya paradigma neftyanoy geologii XXI veka [Fluid dynamic paradigm of oil geology in XXI century]. *Nedropolzovanie XXI vek*, 2014, no. 1, pp. 78–83.

Received: 04 December 2013.

УДК 552.321.6:553.08

КАЛНИНСКИЙ УЛЬТРАМАФИТОВЫЙ МАССИВ ЗАПАДНОГО САЯНА: РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ И ЕЕ ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА

Юричев Алексей Николаевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. петрографии
геолого-географического факультета ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский государственный университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью детального петрологического исследования ультрабазитовых массивов Амыльского хромитоносного района Западного Саяна с позиции их потенциальной рудоносности на хромитовое оруденение и сопутствующую благороднометаллическую минерализацию.

Цель работы: характеристика рудной минерализации в ультрамафитах Калнинского массива для реконструкции эволюции вещественного состава хромшпинелидов и ассоциирующих с ними сульфидов в процессе формирования пород массива и их последующих метаморфических изменений.

Методы исследования: характеристика рудной минерализации в прозрачных шлифах и аншлифах на поляризационном микроскопе AxioScope Carl Zeiss; оценка химического состава хромшпинелидов и сульфидов на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700; содержание золота и ЭПГ в хромитах на квадрупольном ICP MS – спектрометре серии Agilent 7500.

Результаты. Исследованы особенности рудной минерализации Калнинского ультрамафитового массива; показан типоморфизм и химический состав минералов. Полученные данные позволили установить степень частичного плавления исходного субстрата и температуру его метаморфического преобразования при перемещении и консолидации в земной коре. Удалось проследить эволюционную направленность изменения химического состава хромшпинелидов и ассоциирующих с ними сульфидов, которая определяется условиями их деплетирования в верхней мантии и последующими метаморфогенными преобразованиями. По своему химическому составу хромшпинелиды отвечают минералам верхнемантийного субстрата с высокой степенью частичного плавления (28..41 %), который испытал пластические метаморфические преобразования при температурах от 844 до 746 °С, и соответствуют хромшпинелидам из ультрамафитов глубоководных желобов. Сульфидная минерализация, представленная рассеянной вкрапленностью хизлевудита, образовалась в условиях низкотемпературного гидротермального процесса, который способствовал перераспределению высвобождающегося из оливина и ортопироксена никеля и обособлению его в виде самостоятельных минеральных фаз.

Ключевые слова:

Реститы, дуниты, гарцбургиты, хромититы, хромшпинелиды, сульфиды, генезис.

Введение

Массивы ультрабазитов вызывают интерес геологов как с позиции генезиса, учитывая их мантийную природу образования и связь с ранними этапами развития складчатых сооружений, так и с позиции рудоносности. Ультраосновные породы являются источником многих рудных и нерудных полезных ископаемых – Au, ЭПГ, Ni, Cu, Cr, асбеста, драгоценных и поделочных камней. В связи с острым дефицитом легирующих добавок для черной металлургии в России в последние годы также резко возрос интерес к изучению ультрамафитовых массивов как единственного источника хрома.

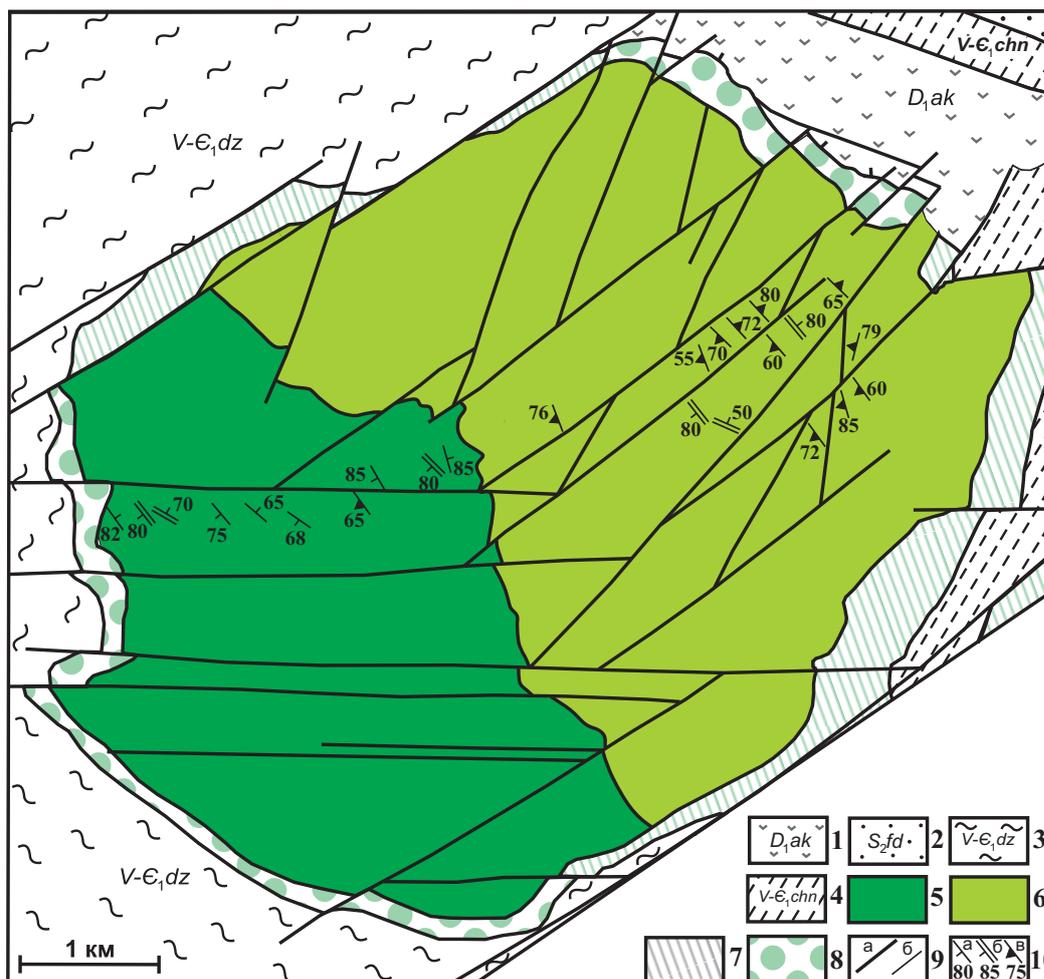
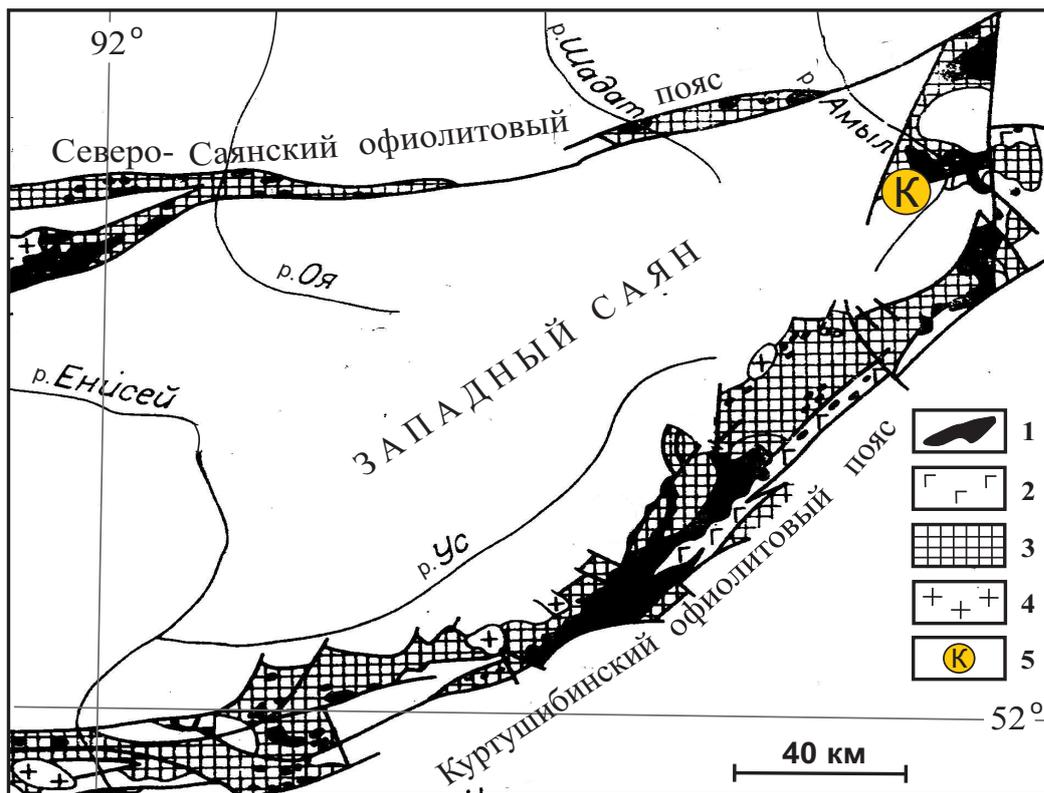
Проявления хромовых руд в пределах Красноярского края известны на Енисейском кряже и Западном Саяне. Наиболее перспективным на данный вид сырья признан Амыльский хромитоносный район Западного Саяна [1], в пределах которого располагается один из потенциально перспективных на хромитовое оруденение Калнинский массив [2, 3], являющийся объектом настоящего исследования.

В статье рассматривается эволюция вещественного состава хромшпинелидов и ассоциирующих с ними сульфидов в процессе формирования пород и их последующих метаморфических изменений.

Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Калнинский ультрамафитовый массив находится в северо-восточной части Западного Саяна в междуречье нижнего течения рр. Кална и Бесь, левых притоков р. Амыл (рис. 1), в геологическом отношении – относится к иджимскому комплексу и, очевидно, является фрагментом нижней части Куртушибинского офиолитового пояса [4]. В плане он имеет субизометричную форму, его площадь составляет примерно 35 км². Массив является тектоническим блоком, окаймленным серпентинитовым меланжем, и сложен метаморфическими перидотитами, которые представляют собой реститовые породы дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса [2, 3].

Северо-восточная часть массива сложена главным образом дунитами; в юго-западной части – дунит-гарцбургитовым полосчатым комплексом. Дуниты и гарцбургиты имеют довольно свежий облик, а в тектонически ослабленных зонах обычно преобразованы в серпентиниты. Среди дунитов северо-восточной части массива встречаются линейные тела полосчатых хромититов. Также среди ультрамафитов устанавливаются дайкообразные тела ортопироксенитов, клинопироксенитов и мелкозернистых габбро.



Дуниты и гарцбургиты обычно характеризуются средне-, крупнозернистыми структурами, нередко – грубозернистыми, и в различной степени подвержены пластическим деформациям, что выражается в появлении неоднородного погасания минералов, полос пластического излома и порфирукластезе, обусловленном синтетектонической рекристаллизацией [5].

Методика исследования

Рудные минералы в породах Калнинского массива изучались в проходящем и отраженном свете на поляризационном микроскопе Axioscop 40 Pol. Анализ их вещественного состава выполнен методом рентгеноспектрального микроанализа [7] на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск). Для этого из отобранных образцов пород с рудной минерализацией были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3...4 мм по рекомендуемым методикам [7]. Перед проведением анализов на исследуемые поверхности предварительно напыляли слой углерода толщиной 25...30 нм. Последующие расчеты химических составов проводились по программе INCA-Issue 18b и по дополнительным авторским программам.

Выявление содержаний золота и платиноидов в хромитах также выполнено в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ на квадрупольном ICP MS-спектрометре серии Agi-

lent 7500. Для анализа предварительно подготовливались порошки путем истирания отобранных зерен хромита.

Рудная минерализация

Хромшпинелиды являются основными рудными минералами в породах Калнинского массива. В гарцбургитах они встречаются редко в виде единичных зерен и небольших скоплений размером до 0,5...1 мм, иногда до 2 мм. Зерна имеют как ксеноморфную, так и эвгедральную, субизометричную форму и окрашены в красно-бурый цвет. Удлиненные индивиды вытягиваются согласно директивности породы.

Выявленные рудопоявления хромшпинелидов Калнинского массива приурочены в большинстве случаев к трещинам в дунитах, в связи с чем данные породы представляют наибольший металлогенический интерес. На желтых корочках выветривания в дунитах постоянно отмечается заметная акцессорная вкрапленность хромшпинелидов (до 5 %, в рудных зонах их содержание возрастает), которые обычно представлены субизометричными и эвгедральными зернами, часто удлиненными эллипсоидальными с размерами около 0,5 мм, редко – до 1,5...2 мм (рис. 2, 3). Зерна окрашены в вишнево-бурый, красно-бурый или темно-бурый цвета, а по трещинкам и периферии – в черный, вследствие их замещения непросвечивающим хроммагнетитом и магнетитом.

Нередко зерна хромшпинелидов обособляются в цепочки, струйки, жилки, которые ориентируются в северо-западном направлении, согласно внутренней полосчатой структуре массива (рис. 2, б).

Рис. 1. Расположение Калнинского ультрамафитового массива в региональных структурах Западного Саяна [6] и схема его геологического строения (составлена по фондовым материалам А.Д. Заболотского, С.Г. Катанова, полевым наблюдениям А.И. Чернышова с дополнениями автора). Для верхнего изображения: 1 – ультрамафиты; 2 – габброиды, комплекс параллельных даек; 3 – спилит-диабазовая формация, углисто-кремнистые сланцы (чингинская свита); 4 – посторогенные граниты ниже-среднедевонского возраста; 5 – Калнинский ультрамафитовый массив. Для нижней схемы: 1 – нижедевонская актуругская свита: андезиты, трахиандезиты, лаво- и пирокластиты, реже трахиандезибазалты, андезибазалты, базальты; 2 – верхнесилурийская федоровская свита: разнозернистые песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты, аргиллиты; 3 – венд-нижнекембрийская джебашская серия: metabазальты, метаморфические сланцы кварцевые, серицит-альбит-кварцевые, хлорит-альбит-кварц-карбонатные, серицит-хлорит-кварц-альбитовые, прослои и линзы мраморов, кальцифиров; 4 – венд-нижнекембрийская чингинская свита: базальты, трахибазальты, глинисто-кремнистые, углеродисто-глинисто-кремнистые, хлорит-кремнистые сланцы, микрокварциты, прослои и линзы металавролитов, метапесчаников, метагравелитов, метаконгломератов; 5–7 – венд-нижнекембрийский Калнинский ультрамафитовый массив: 5 – дунит-гарцбургитовый полосчатый комплекс, 6 – дуниты, 7 – серпентинизированные ультрамафиты нерасчлененные; 8 – серпентиновый меланж; 9 – а) разрывные нарушения, разломы; б) геологические границы; 10 – элементы залегания: а) полосчатости в гарцбургитах, б) минеральной уплощенности, в) хромитовых жилок

Fig. 1. Position of Kalninsky ultramafic massif in regional structures of Western Sayan [6] and diagram of its geological structure (plotted by the materials of A.D. Zabolotsky, S.G. Katanov, on field observations of A.I. Chernyshov with the author's supplements). For the upper image: 1 – ultramafites; 2 – gabbroids, complex of parallel dikes; 3 – spilitite-dibasitic formation, carbon-bearing siliceous shales (chinginskaya strata); 4 – postorogenic granites of Lower-Middle Devonian Age; 5 – Kalninsky ultramafic massif. For the lower image: 1 – Lower-Devonian akturugskaya strata: andesites, trachyandesites, lava- and pyroclastites, more rarely trachy-andesite-basalts, andesite-basalts, basalts; 2 – Upper-Silurian fedorovskaya strata: conseral sandstones, gravelstones, glomerations, siltstones, mudstones; 3 – Vendian Lower Cambrian dzhebashskaya series: metabasalts, metamorphous quartz shales, sericite-albite-quartz, chlorite-albite-quartz-carbonate, sericite-chlorite-quartz-albite, marble and calciphyre beds and lenses; 4 – Vendian Lower Cambrian chinginskaya strata: basalts, trachy basalts, argillaceous-siliceous, carbon-argillaceous-siliceous, chlorite-siliceous shales, micro-quartz rocks, beds and lenses of meta-siltstones, meta-conseral sandstones, meta-gravelstones, meta-glomerations; 5–7 – Vendian Lower Cambrian Kalninsky ultramafic massif: 5 – dunit-harzburgite banded complex, 6 – dunites, 7 – serpentinized undivided ultramafites; 8 – serpentine melange; 9 – a) faults, splits; б) geological boundaries; 10 – attitudes: а) banding in harzburgites, б) mineral flatness, в) chromite veins

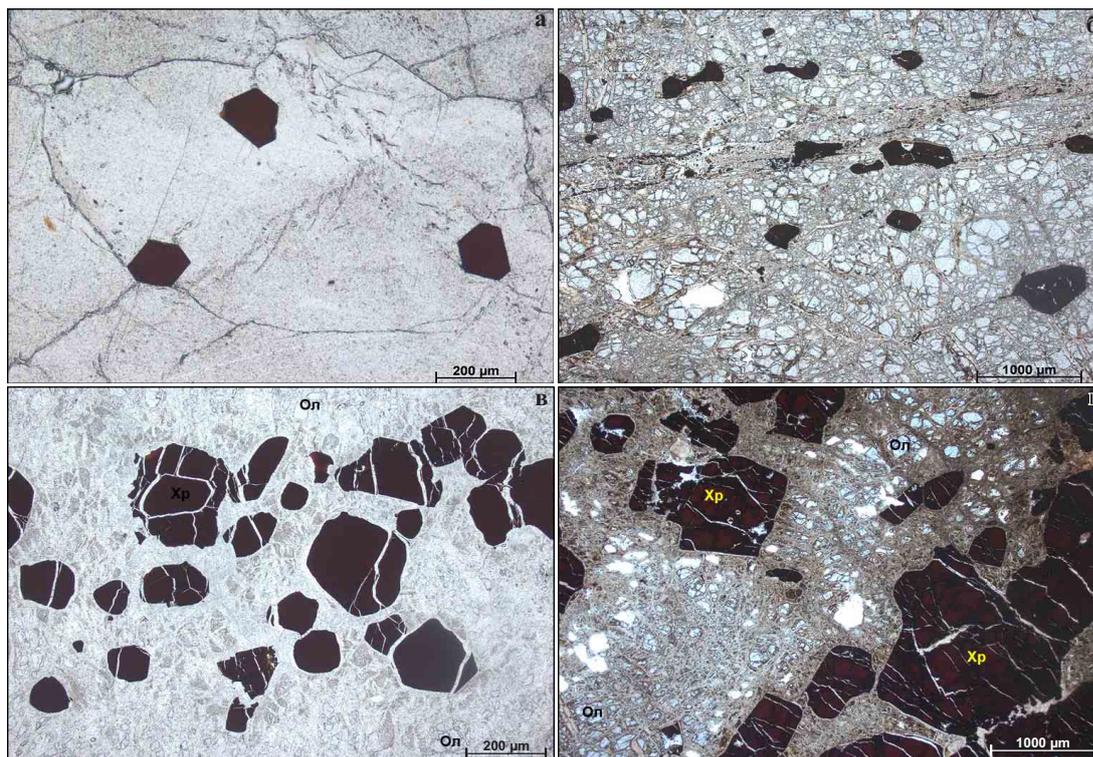


Рис. 2. Хромшпинелиевая минерализация в дунитах Калнинского массива: а) акцессорные зерна хромшпинелидов эвгдральной формы, обр. С-38–306,5; б) акцессорная вкрапленность удлиненных зерен хромшпинелидов, ориентированных субпараллельно согласно трещинкам кливажа и подчеркивающих директивность породы, обр. 7007; в) хромитовая жилка, обр. С-36–271; г) хромитовая густовкрапленная жилка с полосчатой текстурой, обр. 7045/2. Фотографии выполнены в прозрачных шлифах при одном николе. Хр – хромшпинелиды, Ол – серпентинизированный оливин

Fig. 2. Chrome-spinel mineralization in dunites of Kalninsky massif: а) accessory flakes of chromospinelides of euhedral shape, sample С-38–306,5; б) accessory shot of elongated grains of chromospinelides subparallel oriented according to cleavage cracks and pointing out rock directional structure обр. 7007; в) chromite vein, обр. С-36–271; г) chromite thick-embedded vein with banded structure, обр. 7045/2. The photos were taken in transparent sections at one nicol. Хр – chromospinelides, Ол – serpentinized olivine

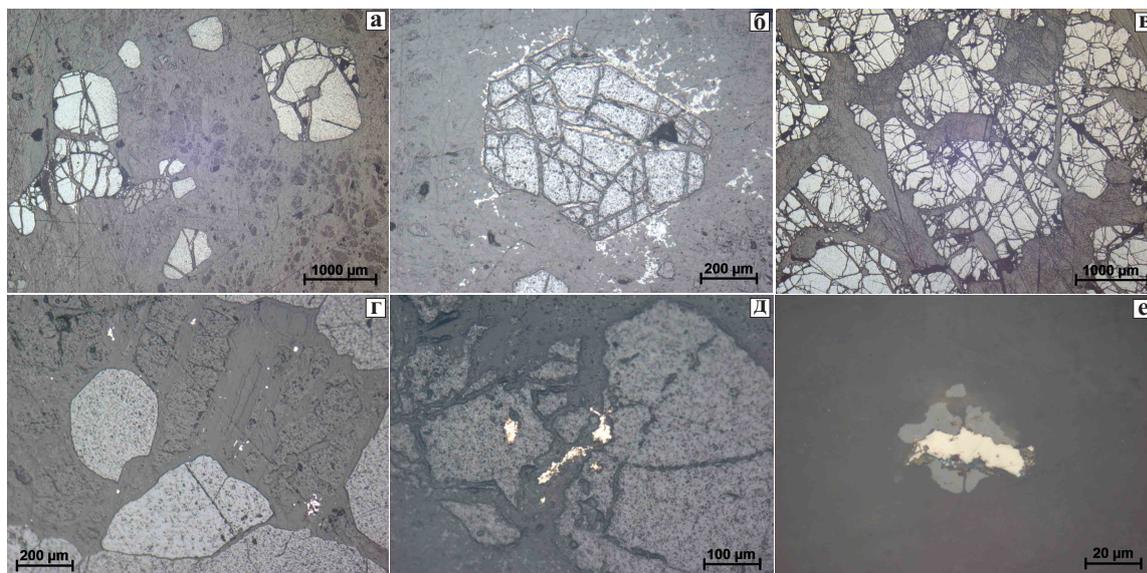


Рис. 3. Хромшпинелиевая и сульфидная минерализации в ультрамафитах Калнинского массива (аншлифы): а, б) акцессорные зерна хромшпинелидов эвгдральной формы; в) густовкрапленные хромиты; г) мелкая сульфидная «сыпь» в интерстициях между зернами хромшпинелидов; д) агрегативные включения хизлевудита в зернах хромшпинелидов; е) самостоятельное зерно хизлевудита в магнетитовой «рубашке»

Fig. 3. Chrome-spinel and sulfide mineralization in ultramafites of Kalninsky massif (polished sections): а, б) accessory flakes of chromospinelides of euhedral shape; в) thick-embedded chromites; г) thin sulfide «fines» in interstices between chromospinelide grains; д) aggregative particles of Heazlewoodite in chromospinelide grains; е) Heazlewoodite magnetite «jacked» sovereign grain

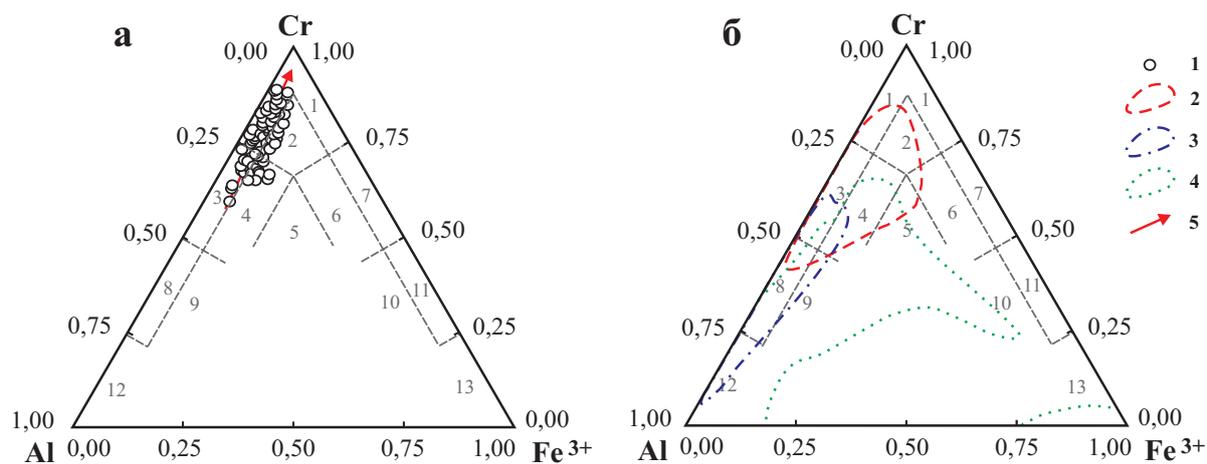


Рис. 4. Составы хромшпинелидов из ультрамафитов Калнинского массива (а), а также поля составов шпинелидов из ультрамафитов различных геодинамических обстановок (б) [9] на классификационной диаграмме Н.В. Павлова [8]: 1) хромиты; 2) субферрихромиты; 3) алюмохромиты; 4) субферриалюмохромиты; 5) ферриалюмохромиты; 6) субалюмоферрихромиты; 7) феррихромиты; 8) хромпикотиты; 9) субферрихромпикотиты; 10) субалюмохроммагнетиты; 11) хроммагнетиты; 12) пикотиты; 13) магнетиты. Условные обозначения: 1 – ультрамафиты Калнинского массива; 2 – ксенолиты ультрамафитов из базальтов; 3 – ультрамафиты срединно-океанических хребтов (СОХ); 4 – ультрамафиты глубоководных желобов (ГЖ); 5 – тренд, отражающий увеличение степени рестирования ультрамафитов

Fig. 4. Composition of chromspinelides from Kalninsky massif (a), fields of compositions of spinelides from ultramafites of different geodynamic conditions (b) [9] on classification diagram N.V. Pavlov [8]: 1) chromites; 2) sub-ferri-chromites; 3) chromohercynites; 4) sub-ferri-chromohercynites; 5) ferri-chromohercynites; 6) sub-alumina-ferri-chromites; 7) ferri-chromites; 8) chrompicotites; 9) sub-ferri-chrompicotites; 10) sub-alumina-chrome-magnetites; 11) chrome-magnetites; 12) picotites; 13) magnetites. Symbols: 1 – ultramafites of Kalninsky massif; 2 – xenolites of ultramafites from basalts; 3 – ultramafites of mid-ocean ridges (MOR); 4 – ultramafites of deep-sea trenches (DST); 5 – trend reflecting the increase of ultramafite restitic degree

Мелкие жилки хромшпинелидов в дунитах имеют вкрапленную структуру (рис. 2, в). Содержание зерен хромшпинелидов в них составляет до 60...70 %, промежутки между которыми выполнены лизардитом с петельчатой структурой. Зерна здесь имеют субизометричную и неправильную форму. Часто они образуют «сросшиеся» агрегаты, в которых отчетливо различаются границы отдельных индивидов размером 1...2,5 мм.

В дунитах в зонах оруденения количество хромшпинелидов существенно возрастает и значительно варьирует от 10 до 50...70 %, с образованием от убого вкрапленных до густо вкрапленных руд (рис. 3, в). Зоны оруденения имеют линейное северо-западное простирание, их мощность, как правило, не превышает 10...15 м. Для них характерно полосчатое строение, обусловленное различной концентрацией хромшпинелидов в дунитовом субстрате (рис. 2, г). Ширина отдельных полосок обычно менее 10 см, нередко внутри них отмечается согласное директивное расположение как отдельных зерен хромшпинелидов, так и их агрегатов. Полосчатость в рудных зонах ориентирована согласно внутренней структуре массива.

Проведенные исследования показывают, что все проанализированные хромшпинелиды характеризуются высокохромистым составом ($Cr_2O_3=51,17...63,94\%$) и в целом очень слабо метаморфизованы. В химическом составе постоянно отмечаются NiO (до 0,29 %), CoO (до 0,15 %), ZnO (до 0,35 %) и V_2O_5 (до 0,27 %).

В соответствии с классификацией Н.В. Павлова [8], в породах Калнинского массива большая часть шпинелидов по химическому составу соответствует хромитам, в значительно меньшем количестве отмечаются алюмохромиты, субферриалюмохромиты и субферрихромиты (рис. 4, а). При этом алюмохромиты и субферриалюмохромиты, очевидно, являются более ранними (из умеренно деплецированных более глубоких разностей пород) разновидностями хромшпинелидов по отношению к хромитам и субферрихромитам о чем свидетельствуют их более высокие значения глиноземистости и магнезиальности при сболее низкой хромистости. Для них характерны также относительно повышенные содержания TiO_2 и ZnO (табл. 1).

На рис. 4, 5 фигуративные точки составов хромшпинелидов образуют линейно вытянутый ряд точек, через который можно провести эволюционный тренд, отражающий преобразование вещественного состава хромшпинелей в мантийных условиях, а также, очевидно, степень рестирования вмещающих их ультрамафитов. Увеличение степени рестирования сопровождается резким возрастанием хромистости при сохраняющемся либо несколько возрастающем значении железистости и уменьшении глиноземистости и магнезиальности (рис. 5). Такая особенность характерна для мантийных реститогенных ультрамафитов [10–13] и служит дополнительным свидетельством реститовой природы пород Калнинского массива.

Таблица 1. Средние составы хромшпинелидов из ультрамафитов Калнинского массива, мас. %**Table 1.** Average composition of chromospinelides from ultramafites of Kalninsky massif, wt. %

Хромшпинелид Chromospinelide	N	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	NiO	ZnO	CoO	Сумма Total
Хромит Chromite	326	0,12	8,35	59,88	0,15	17,29	3,19	0,31	10,22	0,07	0,09	0,07	99,81
Субферрихромит Sub-ferri-chromite	12	0,13	8,99	55,44	0,18	19,10	6,08	0,34	9,27	0,10	0,07	0,07	100,03
Алюмохромит Alumina-chromite	29	0,18	13,72	53,72	0,17	17,63	3,51	0,29	10,66	0,06	0,11	0,06	100,17
Субферриалюмохромит Sub-ferri-alumina-chromite	7	0,16	13,10	52,27	0,17	17,56	5,57	0,34	10,54	0,09	0,10	0,07	100,01

Примечание. Здесь и далее определение химического состава осуществлялось на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), оператор А.С. Кульков.

Note. Hereinafter chemical composition was determined on electron scanning microscope «Tescan Vega II LMU» equipped with energy-dispersive spectrometer (with detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 at TPU «Analytic center of natural system geochemistry» (Tomsk), the operator is A.S. Kulkov.

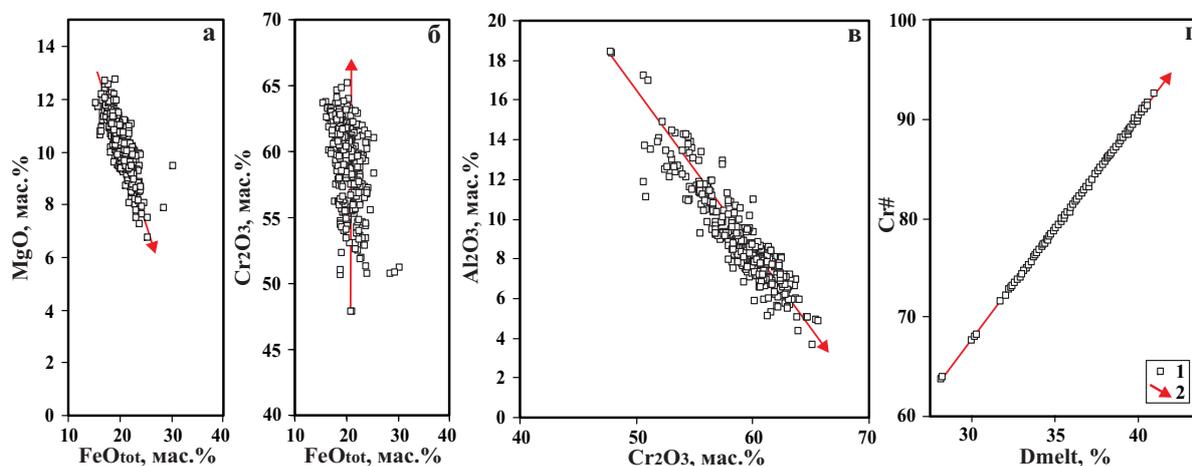


Рис. 5. Бинарные диаграммы (а–в) для хромшпинелидов из ультрамафитов Калнинского массива: 1) исследуемые хромшпинелиды; 2) эволюционный тренд составов хромшпинелидов, отражающий степень рестирования вмещающих его ультрамафитов. График (г) отражает зависимость значений параметра Cr# хромшпинелидов от степени частичного плавления лерцолита Dmelt (по экспериментальным данным [14]): $Cr\# = [Cr / (Cr + Al)] \cdot 100\%$; $Dmelt = 0,426 \cdot Cr\# + 1,538$

Fig. 5. Binary diagrams (a–v) for chromospinelides from ultramafites of Kalninsky massif: 1) the chromospinelides under study; 2) evolution trend of composition of chromospinelides reflecting the restitic degree of ultramafites enclosing it. The diagram (r) reflects the dependence of the values of Cr# parameter of chromospinelides on the degree of Dmelt lherzolite partial melting (by the experimental data [14]): $Cr\# = [Cr / (Cr + Al)] \cdot 100\%$; $Dmelt = 0,426 \cdot Cr\# + 1,538$

Оценка химического состава хромшпинелидов с использованием экспериментальных данных [14] позволила определить степень частичного плавления мантийного субстрата при формировании ультрамафитов Калнинского массива. Согласно расчетам и графическим построениям (рис. 5, г), данные породы формировались при значительной вариации степени частичного плавления мантийного источника – 28...41 %. С использованием оливин-хромшпинелиевого геотермометра Дж. Фабри [15] определены температуры формирования пород, которые составляют от 844 до 746 °С (табл. 2).

Методом ICP-MS анализа в густо вкрапленных хромитах Калнинского массива выявлены следую-

щие содержания платиноидов: Pt=0,021...0,059, Ru=0,016...0,078, Pd=0,008...0,019 г/т. Полученные значения позволяют предполагать платинорутениевую специализацию минералов платиновой группы (ЭПГ) в изученных рудах. Золото, при пороге чувствительности 0,01 г/т, в хромитах не обнаружено.

Сульфидная минерализация редка, отмечается в виде мелких агрегативных включений неправильной формы, заполняющих трещинки в зернах хромшпинелидов, а также преимущественно в виде рассеянной вкрапленности самостоятельных мелких зерен размером до 0,05 мм в интерстициях между индивидами хромшпинелидов (рис. 3, г–е). По химическому составу выявленные сульфиды

близки между собой и соответствуют хизлевудиту, но отличаются от его стехиометрического состава несколько пониженным содержанием никеля при незначительном повышении содержания серы. В химическом составе минерала постоянно отмечается незначительная примесь железа (табл. 3).

Таблица 2. Температурные равновесия, рассчитанные по оливин-хромшпинелидовому геотермометру Дж. Фабри [15] для ультрамафитов Калнинского массива

Table 2. Temperature balance calculated by olivine-chromspinel geothermometer of J. Fabry [15] for ultramafites of Kalninsky massif

Порода Rock	Образец Sample	Оливин Olivine		Хромшпинелид Chromspinelide				T, °C
		MgO	FeO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	
Дунит Dunite	7036/1	49,61	9,10	60,20	7,48	23,00	8,14	792
	7052	49,63	9,06	56,07	10,78	23,20	8,47	768
	7081	50,81	7,51	54,02	14,83	18,82	11,21	789
	7045/1	51,04	7,35	61,72	7,42	19,25	10,52	844
	7074	49,99	8,30	58,92	10,49	19,16	10,35	830
	7007	49,28	9,47	34,92	27,74	23,17	11,95	746
	7017	48,86	9,96	33,49	30,68	21,68	12,77	766
Гарцбургит Harzburgite	7073	49,86	8,60	58,35	10,73	20,69	8,77	762
	7084	50,31	8,29	52,96	16,64	18,11	11,10	785

Таблица 3. Химический состав хизлевудита из ультрамафитов Калнинского массива, мас. %

Table 3. Chemical composition of heazlewoodite from ultramafites of Kalninsky massif, wt. %

Образец Sample	Ni	Co	Fe	Cr	S	Сумма Total
C-37-733_4	71,73	–	1,33	–	26,03	99,09
C-37-733_5	70,43	–	1,41	–	26,91	98,75
C-37-733_1	70,36	–	0,99	–	28,64	99,99
C-37-733_2	71,43	–	1,09	–	27,47	99,99
C-36-271_1	70,39	0,38	0,74	1,38	27,11	100
C-36-271_2	71,09	–	0,45	0,9	27,56	100
C-36-271_3	70,4	–	0,9	1,71	26,99	100
C-36-271_4	71,69	–	0,54	0,75	27,03	100,01
C-36-271_5	69,66	–	0,72	1,02	27,91	99,31
C-36-271_1	70,25	0,55	0,97	1,03	27,2	100
среднее/average	70,74		0,91	1,13	27,28	99,71

Обсуждение результатов и выводы

Впервые в данной работе предпринята попытка охарактеризовать как хромшпинелиевую, так и сульфидную минерализации, отмеченные в породах Калнинского ультрамафитового массива. При этом помимо типоморфизма и особенностей химического состава показано взаимоотношение между двумя этими группами рудных минералов.

Полученные результаты позволяют предположить, что в Калнинском массиве хромшпинелиевое оруденение представлено преимущественно вкрапленными рудами с широкими вариациями содержания хромшпинелидов, которые обнаружи-

вают единый линейный эволюционный тренд составов. Он отражает изменение составов хромшпинелидов в мантийных условиях [16–18] и, очевидно, обусловлен степенью рестирования вмещающих ультрамафитов. На подобные изменения состава хромшпинелидов обращали внимание зарубежные исследователи при изучении ультрамафитов из офиолитовых комплексов [11].

Существенное преобладание хромитов над другими хромшпинелидами, очевидно, указывает на высокую интенсивность деплетирования исходного мантийного вещества. В общем, по химизму хромшпинелиды относятся к высокохромистым разностям и характеризуются платинорутениевой специализацией ЭПГ. Однако в данном ряду может добавиться также иридий или осмий, содержания которых в шпинелидах автором не оценивались.

По своему химическому составу хромшпинелиды отвечают минералам верхнемантийного субстрата с высокой степенью частичного плавления (28...41 %), который испытал пластические метаморфические преобразования при температурах от 844 до 746 °C, и соответствуют хромшпинелидам из ультрамафитов глубоководных желобов (рис. 4, б).

Формирование хромитового оруденения, по мнению автора, осуществлялось в дунитах в зонах интенсивного высокотемпературного пластического течения, вдоль полосчатости дунит-гарцбургитового субстрата массива. В процессе пластического течения происходила сегрегация хромшпинелидов в отдельные параллельные полосы, которая сопровождалась «выдавливанием» из них пластического оливина. В результате неравномерного «выдавливания» оливина сформировались хромитовые рудные образования от убого вкрапленных до густо вкрапленных. На последующих стадиях в локальных участках наибольших деформаций сформировались маломощные мономинеральные хромитовые жилки с массивной текстурой, из которых оливин был полностью удален.

Сульфидная минерализация, наблюдаемая в виде рассеянной вкрапленности мелких зерен в интерстициях между индивидами хромшпинелидов, а также и внутри них, представлена поздними (эпигенетическими) выделениями хизлевудита. Данный минерал, по предположению автора, образовался в условиях низкотемпературного гидротермального процесса, который способствовал перераспределению никеля, высвобождающегося из оливина и ортопироксена, и обособлению его в виде самостоятельных минеральных фаз. Данный вывод хорошо согласуется с наблюдениями А.Б. Макеева, который отнес хизлевудит, отмечаемый в ультрабазитах из офиолитовых комплексов, к акцессорным сульфидам второй генерации, возникновение которой происходило в процессе массовой α -лизардитизации ультраосновных пород при температуре 400–250 °C во время регрессивного регионального аутометаморфизма ультрабазитов зеленосланцевой фации [12].

Таким образом, в реститовых ультрамафитах выявляется эволюционная направленность в изменении химического состава хромшпинелидов и ассоциирующих с ними сульфидов, которая опреде-

ляется главным образом условиями их деплетирования в верхней мантии, а также последующими метаморфогенными преобразованиями в земной коре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы хромитовости и платиновости гипербазитов Верхнеамурского района в Западном Саяне / А.П. Кривенко, М.Ю. Подлипский, А.И. Кубышев, С.Г. Катанов // Минеральные ресурсы Красноярского края. – Красноярск: КНИИГиМС, 2002. – С. 314–324.
2. Еханин Д.А. Геологическое строение и перспективы рудоносности Калнинского ультрабазитового массива // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 9. – С. 24–28.
3. Чернышов А.И., Юричев А.Н. Петроструктурная эволюция ультрамафитов Калнинского хромитового массива в Западном Саяне // Геотектоника. – 2013. – № 4. – С. 31–46.
4. Петрология и метаморфизм древних офиолитов (на примере Полярного Урала и Западного Саяна) / под ред. В.С. Соболева, Н.Л. Добрецова. – Новосибирск: Наука, 1977. – 222 с.
5. Чернышов А.И. Ультрамафиты (пластическое течение, структурная и петроструктурная неоднородность). – Томск: Чародей, 2001. – 214 с.
6. Сибилев А.К. Петрология и асбестовосность офиолитов (на примере Иджимского массива в Западном Саяне). – Новосибирск: Наука, 1980. – 213 с.
7. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
8. Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды Геологического института РАН. – 1949. – Вып. 103. – № 3. – 91 с.
9. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks // Journal of petrology. – 2001. – V. 42. – № 12. – P. 2279–2302.
10. Юричев А.Н. Акцессорные шпинелиды из ультрамафитов: индикаторы условий формирования // Руды и металлы. – 2013. – № 6. – С. 30–34.
11. Dick H.J.B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // Contrib. Mineral. Petrol. – 1984. – V. 84. – P. 54–76.
12. Макеев А.Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. – СПб.: Наука, 1992. – 197 с.
13. Перевозчиков Б.В. Особенности изучения хромитовости альпинотипных гипербазитов. – М.: Геоинформмарк, 1998. – 47 с.
14. Леснов Ф.П., Подлипский М.Ю. Геохимия акцессорных хромшпинелидов из пород Эргакского хромитового гипербазитового массива и условия его формирования (Западный Саян) // ДАН. – 2008. – Т. 422. – № 5. – С. 660–664.
15. Fabries J. Spinel-olivine Geothermometry in Peridotites from Ultramafic Complexes // Contrib. Miner. and Petrol. – 1979. – V. 69. – № 4. – P. 329–336.
16. Перевозчиков Б.В., Плотноков А.В., Макиев Т.Т. Природа вариаций состава рудной и акцессорной хромшпинели ультрабазитового массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. – 2007. – № 4. – С. 32–39.
17. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация идарского дунит-гарцбургитового комплекса (Северо-Запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 69–75.
18. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Кульков А.С. Рудная минерализация Агардагского ультрамафитового массива (Республика Тыва) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 130–136.

Поступила 12.08.2014 г.

UDC 552.321.6:553.08

THE KALNINSKY ULTRAMAFIC MASSIF OF WESTERN SAYAN: ORE MINERALIZATION AND ITS GENETIC NATURE

Alexey N. Yurichev,

Cand. Sc., National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: juratur@sibmail.com

Relevance of the work is caused by the need of detailed petrological studies of ultrabasic massifs of Amylsky chromite-bearing area of the Western Sayan in terms of their potential for chromite ore and associated precious metal mineralization.

The main aim of the study is to characterize mineralization in Kalninsky ultramafic massif for reconstructing the evolution of the material composition of chromites and sulfides associating with them at massif rocks formation and their subsequent metamorphic changes.

The methods used in the study: characteristics of mineralization in transparent and polished sections on the polarizing microscope Axioscope Carl Zeiss; evaluation of chemical composition of chromospinelides and sulfides on scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometer (detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700; content of Au and PGE in chromites on quadrupole ICP MS – Agilent 7500 series spectrometer.

The results. The author has studied the features of ore mineralization of the Kalninsky ultramafic massif. The paper introduces minerals tipomorfizm and chemical compound. The resulted data allowed determining the degree of partial melting of the initial substrate and the temperature of its metamorphic transformation when moving and consolidating in the earth's crust. The author could trace the evolutionary direction in change of chromospinelide and associated sulphides chemical composition. It was determined by the conditions of their depletion in the upper mantle and subsequent metamorphic transformations. The chemical composition of chromospinelides correspond to minerals of upper mantle substrate with a high degree of partial melting (28..41 %) and to chromospinelides from ultrama-

fites of oceanic trenches. The substrate has undergone plastic metamorphism at temperatures from 844 to 746 °C. Sulphidic mineralization represented by scattered impregnation of heazlewoodite was formed during low-temperature hydrothermal process. The latter contributed to nickel redistribution released from the olivine and orthopyroxene and to its localization as independent mineral phases.

Key words:

Restites, dunites, harzburgites, chromitites, chromspinelides, sulphides, genesis.

REFERENCES

1. Krivenko A.P., Podlipsky M.Yu., Kubyshev A.I., Katanov S.G. *Perspektivy khromitonosnosti i platinonosnosti giperbazitov Verkhneamyl'skogo rayona v Zapadnom Sayane* [Prospects of platinum and chromite-bearing giperbazites of Verkhneamyl'sky district in the Western Sayan]. *Mineralnye resursy Krasnoyarskogo kraja* [Mineral Resources of the Krasnoyarsk region]. Krasnoyarsk, KNNIGIMS Publ., 2002. pp. 314–324.
2. Ekhanin D.A. Geologicheskoe stroenie i perspektivy rudonosnosti Kalninskogo ultrabazitovogo massiva [Geological structure and ore-bearing prospects of Kalninsky ultrabazic massif]. *Razvedka i okhrana neдр*, 2010, no. 9, pp. 24–28.
3. Chernyshov A.I., Yurichev A.N. Petrostrukturnaya evolyutsiya ultramafitov Kalninskogo khromitonosnogo massiva v Zapadnom Sayane [Petrostructural evolution of ultramafic rocks of the Kalninsky chromite-bearing massif, Western Sayan]. *Geotectonics*, 2013, no. 4, pp. 31–46.
4. *Petrologiya i metamorfizm drevnikh ofiolitov (na primere Polyarnogo Urala i Zapadnogo Sayana)* [Petrology and metamorphism of ancient ophiolites (by the example of the Polar Urals and Western Sayan)]. Ed. by V.S. Sobolev, N.L. Dobretsov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 222 p.
5. Chernyshov A.I. *Ultramafity (plasticheskoe techenie, strukturnaya i petrostrukturnaya neodnorodnost)* [Ultramafics (plastic flow, structural and petrostructural heterogeneity)]. Tomsk, Charodey Publ., 2001. 214 p.
6. Sibilev A.K. *Petrologiya i asbestonosnost ofiolitov (na primere Idzhim'skogo massiva v Zapadnom Sayane)* [Petrology and asbestos-bearing of ophiolites (by the example of Idzhimsky massif in the Western Sayan)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 213 p.
7. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.
8. Pavlov N.V. Khimichesky sostav khromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ultraosnovnykh intruzivov [Chemical composition of chromspinelides in connection with the petrographic composition of the rocks of ultramafic intrusive]. *Trudy Geologicheskogo instituta RAN*, 1949, vol. 103, no. 3, 91 p.
9. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of petrology*, 2001, vol. 42, no. 12, pp. 2279–2302.
10. Yurichev A.N. Aktsessornye shpinelidy iz ultramafitov: indikatory uslovy formirovaniya [Accessory spinels from ultramafites: indicators of formation conditions]. *Rudy i metally*, 2013, no. 6, pp. 30–34.
11. Dick H.J.B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1984, vol. 84, pp. 54–76.
12. Makeev A.B. *Mineralogiya alpinotipnykh ultrabazitov Urala* [Mineralogy of alpine ultrabazites of the Ural]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1992. 197 p.
13. Perevozchikov B.V. *Osobennosti izucheniya khromitonosnosti alpinotipnykh giperbazitov* [The peculiarities of chromite-bearing alpine ultramafics]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1998. 47 p.
14. Lesnov F.P., Podlipsky M.Yu. Geokhimiya aktsessornykh khromshpinelidov iz porod Ergak'skogo khromitonosnogo giperbazitovogo massiva i usloviya ego formirovaniya (Zapadnyy Sayan) [Geochemistry of accessory chromspinelides from rocks of Ergak'sky chromite-bearing ultramafic massif and conditions of its formation (West Sayan)]. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 422, no. 5, pp. 660–664.
15. Fabries J. Spinel-olivine Geothermometry in Peridotites from Ultramafic Complexes. *Contrib. Miner. and Petrol.*, 1979, vol. 69, no. 4, pp. 329–336.
16. Perevozchikov B.V., Plotnikov A.V., Makiev T.T. Priroda variatsiy sostava rudnoy i aktsessornoy khromshpineli ultrabazitovogo massiva Syum-Keu (Polyarny Ural) [Nature of variations in the composition of the ore and accessory chromspinelites from Syum-Kaew ultrabasic massif (Polar Urals)]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2007, no. 4, pp. 32–39.
17. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya idarskogo dunit-gartsburgitovogo kompleksa (Severo-Zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of the Idarsky dunit-harzburgite complex (northwest of Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 69–75.
18. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Kulkov A.S. Rudnaya mineralizatsiya Agardagskogo ultramafitovogo massiva (Respublika Tyva) [Ore mineralization of the Agardag ultramafic massif (Republic of Tyva)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 130–136.

Received: 12 August 2014.

УДК 553.982

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКИХ И ПАРАФИНИСТЫХ НЕФТЕЙ ПО ПЛОЩАДИ И РАЗРЕЗУ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Красноярова Наталья Алексеевна,

канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр. лаборатории природных превращений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4; доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического Университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: natalex@ipc.tsc.ru

Яценко Ирина Германовна,

канд. геол.-минерал. наук, заведующая лабораторией «Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефтей» Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: sric@ipc.tsc.ru

Серебренникова Ольга Викторовна,

д-р хим. наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; заведующая лабораторией природных превращений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: ovs@ipc.tsc.ru

Рассмотрен ресурсный потенциал вязких парафинистых нефтей юго-востока Западной Сибири, в частности Томской области. Изучение таких нефтей является крайне актуальной задачей при вынужденном переходе в настоящее время к широкомасштабному освоению трудноизвлекаемых запасов. Получены данные по составу и свойствам нефтей новых скважин на территории Томской области. База данных нефтей Института химии нефти СО РАН дополнена описанием свойств 16 нефтей из скважин Майского, Средне-, Западно- и Южно-Майского месторождений, Фестивальной, Восточно- и Южно-Фестивальной площадей и 3 нефтей Киев-Еганского месторождения. По данным о физико-химических свойствах исследованных нефтей (плотности при 20 °С, вязкости при 20 и 50 °С, температуре застывания, содержанию серы и парафинов, выходу дистиллятных фракций 200 и 300 °С) проведена оценка и классификация согласно техническим требованиям к нефтям, поступающим в систему трубопроводного транспорта при последующей поставке на экспорт. Полученные геохимические характеристики нефтей по составу n-алканов свидетельствуют об окислительных, реже о субокислительных условиях накопления генерировавшего их органического вещества, о широком диапазоне изменения их термической преобразованности (от слабой до существенной). Проведен анализ специфики залегания и размещения вязких парафинистых нефтей юго-востока Западной Сибири. Установлено, что залежи наиболее вязких нефтей, с большим содержанием серы, парафинов, смол и асфальтенов и высоким газосодержанием, расположены в области переходного седиментогенеза бассейна. Анализ специфики залегания и размещения позволяет дать точный пространственный прогноз зональности и обнаружения вязких парафинистых нефтей.

Ключевые слова:

Вязкие парафинистые нефти, физико-химические свойства нефти, геохимические характеристики нефтей, возраст нефтемещающих пород, Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн.

В связи с исчерпанием запасов легкодоступных маловязких нефтей как в нашей стране, так и в мире, наблюдается рост доли трудноизвлекаемых запасов в общем нефтяном балансе. Как правило, восполнение отбираемых из недр объемов углеводородов в современных условиях происходит за счет открытия менее привлекательных с экономической точки зрения запасов. Это общемировая тенденция, и Россия в этом плане не является исключением [1–3]. Поэтому в последние годы обсуждение проблем, осложняющих добычу углево-

дородов, поднималось в научной литературе множеством отечественных [4–11] и зарубежных специалистов [12–15]. К трудноизвлекаемым относятся запасы нефтей, заключенные в геологически сложно построенных пластах и залежах или представленные малоподвижной нефтью, например, с высокой вязкостью и высоким содержанием твердых парафинов [16–20].

Постоянное увеличение в общем объеме добычи доли вязких парафинистых нефтей (ВПН) ставит перед нефтяниками ряд сложных технических

проблем. Отложение парафинов в призабойной зоне пласта и на поверхности нефтепромыслового оборудования является одним из серьезных осложнений при эксплуатации скважин и трубопроводного транспорта [15, 18].

Выявление признаков обнаружения высоковязких парафинистых нефтей, анализ специфики их залегания и размещения нефтегазоносных комплексов с вязкими парафинистыми нефтями на территории юго-востока Западной Сибири с использованием статистических методов и современных геолого-информационных способов представления позволяет дать точный пространственный прогноз зональности и обнаружения ВПН.

Основные мировые запасы углеводородов сосредоточены в вязкой и тяжелой нефти. По разведанным запасам тяжелой нефти Россия занимает третье место в мире после Канады и Венесуэлы. Одной из наиболее важных наблюдаемых сейчас тенденций является снижение добычи легкой нефти и нефти средней плотности, так как запасы нефти, удобные для добычи, истощаются ускоренными темпами. Кроме того, отмечено снижение темпов прироста ресурсов нефти, что обуславливает повышенный интерес к высоковязким нефтям, число разрабатываемых месторождений которых во многих странах мира в последние годы значительно возросло.

Термин «высоковязкие нефти» не имеет строгого количественного определения. Это касается как нижней, так и верхней границ величин вязкости, которые определяются главным образом с технологических позиций. Чаще употребляется термин «тяжелые нефти», который отождествляется с понятием «высоковязкие нефти». К ним относят нефти плотностью свыше $0,920\text{--}0,935\text{ г/см}^3$. Использование плотности нефти в качестве классификационного критерия обусловлено большей простотой и оперативностью ее определения по сравнению с вязкостью. При существовании общей зависимости между плотностью и вязкостью нефтей выявлено достаточно большое число залежей, содержащих тяжелые, но не высоковязкие нефти или высоковязкие, но не тяжелые нефти [20]. В понятии «тяжелые высоковязкие нефти» смешаны две разные характеристики нефтей, используемые в промышленной практике для различных целей. Плотность нефтей представляет интерес для специалистов, занимающихся вопросами ее переработки, а вязкость привлекает внимание специалистов в области разработки нефтяных месторождений. Среди основных характеристик состава нефтей относительно устойчивая связь этих двух параметров проявляется при учете содержания в них парафинов. Именно поэтому в последние годы используется термин высоковязкие парафинистые нефти.

При этом необходимо отметить низкую степень изученности физико-химических свойств ВПН на месторождениях Западной Сибири. Именно поэтому полученные данные по составу и свойствам неф-

тей новых скважин на территории Томской области представляют безусловный интерес как для добычи и переработки нефти [21, 22], так и для пополнения базы данных (БД) по составу нефтей Института химии нефти СО РАН с целью расширения возможностей прогноза зональности и обнаружения ВПН. В последние годы БД была дополнена описанием свойств 16 нефтей (табл. 1) из скважин Майского, Средне-, Западно- и Южно-Майского месторождений, Фестивальной, Восточно- и Южно-Фестивальной площадей и 3 нефтей Киев-Еганского месторождения [23, 24]. Совокупность этих нефтей явилась предметом настоящего исследования.

Все изученные нефти относятся к малосернистым – содержание серы менее 0,4 %. Значения плотности майских нефтей меняются в диапазоне от 798,5 до 845,0, фестивальных – 756,3–872,0, киев-еганских – 0,809–0,831,4 г/см³. Все нефти относятся к особо легкому (до 830,0 г/см³) и легкому (830,1–850,0 г/см³) типу, за исключением нефти Фестивального месторождения (пласт Ю₁) – плотность более 870,1 г/см³ соответствует тяжелому типу (рис. 1) [25].

Для нефтей Киев-Еганского месторождения характерна отрицательная температура застывания, что вместе с низким содержанием парафинов (3,8–4,9 %) определяет качественные реологические свойства для ее транспортировки (табл. 2). Температура застывания почти всех исследованных нефтей майской и фестивальных групп находится в положительном диапазоне, кроме нефти Южно-Майского месторождения.

Отличительной характеристикой большей части исследованных нефтей является повышенное содержание парафинов. Наибольшими значениями вязкости и содержания парафинов отличаются нефти Западно-Майского, Фестивального и Южно-Фестивального месторождений, эти образцы относятся к ВПН, а Киев-Еганского – к маловязким нефтям.

Для нефтей майской группы содержание парафинов меняется от 2,0 до 9,4 %, для фестивальной – от 7,43 до 13,9 %. При этом в этих группах отмечено низкое содержание асфальтенов (в среднем 0,45 и 1,24 % соответственно), смол (в среднем 2,13 и 1,35 %). По содержанию массовой доли парафинов нефти Фестивальной (Ю₁₆), Майской (Ю₁₅, Ю₁³⁻⁴) и Западно-Майской площадей не соответствуют нефтям для приема в систему трубопроводного транспорта при последующей поставке на экспорт, поскольку они превышают норму по этому показателю (более 6 %) и являются парафинистыми (рис. 1).

Согласно техническим условиям на нефть [25] для нефтей «0» типа выход дистиллятных фракций 200 и 300 °С должен составлять 30 и 52 % об. соответственно. Большинство нефтей майской группы соответствуют этому типу, за исключением нефтей пластов Ю₁₋₃ (21,0 и 41,0 % – тип «1»), Ю₁³⁻⁴ (29,5 и 48,5 % – тип «2») и Ю₁₆ (13,0 и 38,0 % – тип «3»). Для фестивальных нефтей только две

Таблица 1. Физико-химические свойства исследованных нефтей

Table 1. Physicochemical properties of the oils under study

Месторождение Oil field	Индекс пласта Reservoir index	Содержание серы, мас. % Sulfur content, wt. %	Плотность при 20 °С, кг/м ³ Density at 20 °C, kg/m ³	Вязкость, мПа*с Field viscosity, mPa*s		Температура застывания Pour point °C	Содержание парафинов, мас. % Paraffin content, wt. %
				20	50		
Майское Mayskoe	Ю ₁₅	следы traces	794,0	4,8	1,7	4,5	7,21
	Ю ₁₄₋₁₅ , Ю ₁₁		798,5	7,3	2,1	8,4	5,11
	Ю _{7²⁻⁴}	0,34	845,0	28,2	5,9	7,6	7,86
	Ю ₁₄₋₁₅	796,0	12,6	2,0	1,7	3,35	
Средне-Майское Sredne-Mayskoe	Ю ₁₄₋₁₅ , Ю ₁₂	следы traces	792,7	5,2	2,8	5,7	4,25
	Ю ₁₄₋₁₅		789,9	3,0	1,8	–	3,57
Южно-Майское Yuzhno-Mayskoe	Ю ₁₋₃	0,33	837,5	7,5	3,2	–3,4	1,96
Западно-Майское Zapadno-Mayskoe	Ю ₁₄₋₁₆	следы traces	808,0	10,6	1,6	7,5	3,49
	Ю ₁₆		821,0	84,7	2,3	12,0	9,44
Фестивальное Festivalnoe	Палеозой Paleozoic	0,14	828,0	10,9	11,8	26,5	10,90
			следы traces	816,0	365,9	5,3	16,8
	Ю ₉	831,0	40,9	6,2	15,9	13,40	
	Ю ₁	0,13	872,0	не течет does not flow	8,4	32,4	8,76
	Ю ₉	834,5	28,7	13,5	16,5	13,90	
Южно-Фестивальное Yuzhno-Festivalnoe	Ю ₁₆	следы traces	814,0	563,9	4,5	17,3	8,43
Восточно-Фестивальное Vostochno-Festivalnoe	Ю ₁₄₋₁₅		756,3	2,4	0,6	9,6	7,43
Киев-Еганское Kiev-Eganskoe	К ₁	0,2	828,0	11,8	2,4	–5,5	4,1
	Ж ₁	0,2	831,4	5,05	3,14	–4,5	3,8
	Ж ₃	0,18	809,0	9,6	6,5	–22,7	4,9

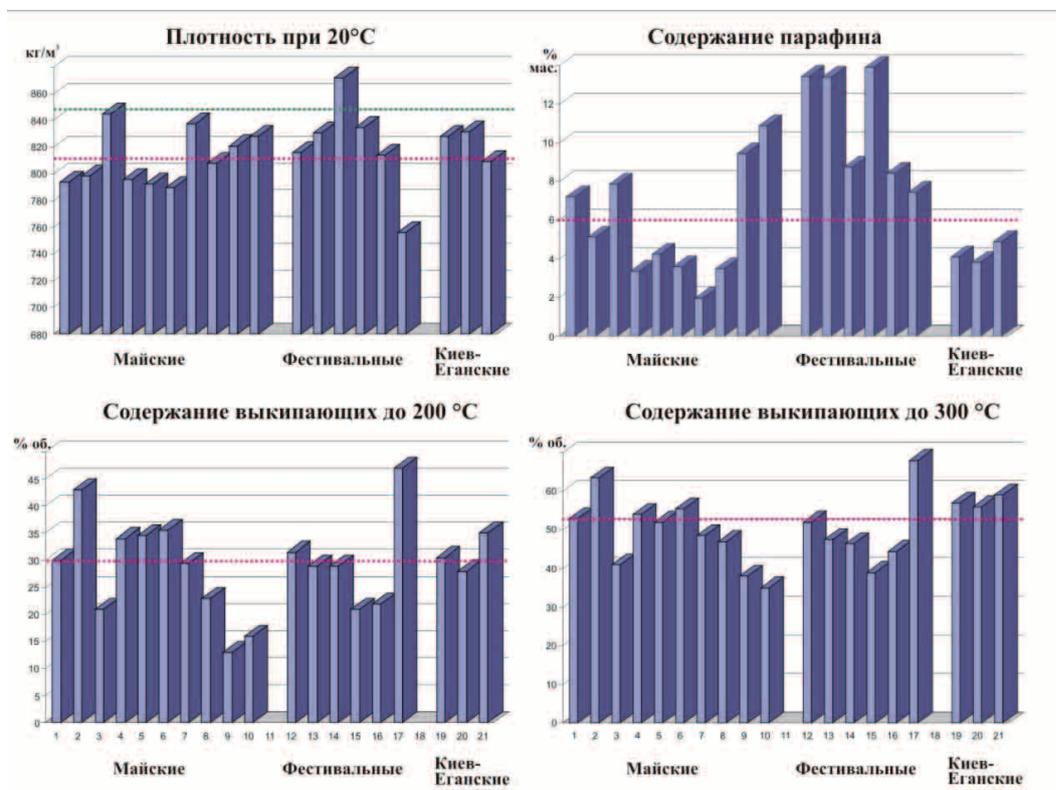


Рис. 1. Характеристика исследованных нефтей

Fig. 1. Characteristics of the oil

нефти (Ю₁₄₋₁₅ и палеозой*) соответствуют «0» типу, еще две (Ю₉* и палеозой) отнесены к «1» типу, оставшиеся – к третьему.

Нефти майской группы в большинстве существенно термически преобразованы (табл. 2), о чем свидетельствуют отношения нормальных к изопреноидным алканам (пристан/н-С₁₇ и фитан/н-С₁₈). Исходный органический материал отлагался в окислительных условиях: практически для всех исследованных образцов значение отношения пристана к фитану больше 3. Исключение составляют нефти пласта Ю₁³⁻⁴ Майской площади и пласта Ю₁₄₋₁₅ Средне-Майской, для которых величина отношения пристана к фитану указывает на субокислительные условия захоронения исходного органического вещества (ОВ). В этих же нефтях обнаружено присутствие ванадиловых комплексов порфиринов (VO-p), свидетельствующих о морском происхождении ОВ.

Нефти Фестивальной площади характеризуются отсутствием металлопорфиринов (табл. 2), существенной термической преобразованностью ОВ в отложениях тюменской свиты и палеозоя, только в верхнем горизонте площади нефть (Ю₁) незрелая либо биодegradирована [26].

Для нефтей Киев-Еганского месторождения отмечены субокислительными условиями захоронения ОВ (пристан/фитан 1,9–2,0). Наличие в пласте

К₁ никелевых порфиринов (Ni-p) указывает на отсутствие сероводородного заражения в бассейне седиментации, а совместное присутствие комплексов порфиринов с никелем и ванадилем (пласт J₃) – на связь бассейна осадконакопления с морем. Нефти киев-еганской группы умеренно термически преобразованы.

Таким образом, нефти майской группы в большинстве существенно термически преобразованы, генерировавшее их органическое вещество накапливалось в окислительных условиях. Исключение составляет нефть пласта Ю₁³⁻⁴, в составе которой, кроме того, отмечено присутствие ванадиловых комплексов порфиринов. Осадки, сформировавшие умеренно преобразованные нефти киев-еганской группы, характеризуются субокислительными условиями захоронения, наличием никель- и ванадилпорфиринов в следовых количествах. Нефти Фестивальной площади характеризуются отсутствием металлопорфиринов, существенной термической преобразованностью в отложениях нижней юры и палеозоя, умеренной зрелостью в средней юре и слабой термической преобразованностью нефти горизонта Ю₁.

На рис. 2 представлено распределение месторождений ВПН на юге Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Видно, что 15 из 17 месторождений ВПН приурочены к переходной фа-

Таблица 2. Характеристика исследованных нефтей по составу n-алканов и металлопорфиринов

Table 2. Characteristic of the oils by the composition of n-alkanes and metalloporphyrins

Месторождение Field	Индекс пласта Reservoir index	Пристан/ Фитан Prystane/Phytane	Пристан/н-С ₁₇ Prystane/н-С ₁₇	Фитан/н-С ₁₈ Phytane/ н-С ₁₈	н-С ₁₇ н-С ₂₇	VO-p	Ni-p
Майское Mayskoe	Ю ₁₅	2,41	0,22	0,09	3,17	0	0
	Ю ₁₄₋₁₅ , Ю ₁₁	3,69	0,19	0,05	5,41		
	Ю ₁ ³⁻⁴	1,22	0,58	0,38	2,51	4	следы traces
	Ю ₁₄₋₁₅	3,33	0,16	0,06	14,41	0	
	Ю ₁₄₋₁₅ , Ю ₁₁	3,12	0,18	0,06	2,92		
Средне-Майское Sredne-Mayskoe	Ю ₁₄₋₁₅ , Ю ₁₂	3,56	0,21	0,07	2,05	8	
	Ю ₁₄₋₁₅	1,90	0,64	0,37	4,71		
Южно-Майское Yuzhno-Mayskoe	Ю ₁₋₃	3,57	0,17	0,05	2,15	0	
Западно-Майское Zapadno-Mayskoe	Ю ₁₆	3,41	0,16	0,05	1,75		
	Фестивальное Festivalnoe	Палеозой Paleozoic	3,00	0,19	0,06		
		3,27	0,19	0,06	2,82		
Ю ₉ *		1,50	0,70	0,42	1,9		
Ю ₁		7,10	2,10	0,29	0,49		
Южно-Фестивальное Yuzhno-Festivalnoe	Ю ₉	5,74	0,80	0,13	3,12		
Южно-Фестивальное Yuzhno-Festivalnoe	Ю ₁₆	2,47	0,16	0,07	3,76		
Восточно-Фестивальное Vostochno-Festivalnoe	Ю ₁₄₋₁₅	5,71	0,52	0,10	5,75		
Киев-Еганское Kiev-Eganskoe	К ₁	1,90	0,88	0,59	2,5		
	J ₁	1,94	0,77	0,47	3,47	0	
	J ₃	2,00	0,78	0,54	3,24	следы traces	3

Таблица 3. Физико-химические свойства ВПН континентальной и переходной фациальных областей на территории Западной Сибири**Table 3.** Physicochemical properties of viscous waxy oils (VPO) of continental and transitional facial areas in western Siberia

Показатели нефти Oil indices		Переходная/Transitional		Континентальная/Continental	
		фациальная область/facial area			
		Объем выборки Sample size	Среднее значение Average value	Объем выборки Sample size	Среднее значение Average value
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³		31	0,8493	2	0,8710
Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at 20 °С, mm ² /s		32	455,17	2	37,65
Содержание мас. % Content of, wt. %	серы/sulfur	19	0,67	2	0,30
	парафинов/paraffins	32	10,64	2	6,70
	смола/resins	32	4,23	2	3,30
	асфальтенов/asphaltenes	31	1,23	2	0,40
Фракция до 200 °С, мас. % Fraction up to 200 °С, wt. %		7	12,85	1	10,00
Фракция до 300 °С, мас. % Fraction up to 300 °С, wt. %		6	29,08	1	32,00
Газосодержание в нефти, м ³ /т Gas content in oil, m ³ /t		7	148,64	1	27,00
Термобарические условия залегания/Thermobaric storage conditions					
Температура пласта, °С Reservoir temperature, °С		9	103,50	1	79,00
Пластовое давление, МПа Reservoir pressure, mPa		7	28,46	1	16,60

циальной области, а два (Толумское и Южно-Толумское) – к континентальной фациальной области (рис. 2).

Существует разница в условиях залегания и физико-химических свойствах между нефтями переходной и континентальной областей – в переходной фациальной области ВПН залегают в пластах с более высокой пластовой температурой и давлением (табл. 3). Они характеризуются меньшей плотностью, большей вязкостью, большим содержанием серы, парафинов, смол и асфальтенов и высоким газосодержанием.

Основное количество месторождений с ВПН в Томской области расположено в пределах Нюрольской фациальной зоны, а два из них – Мыльджинское и Пуглалымское – находятся в Среднеvasюганской фациальной зоне (рис. 3).

Сопоставление свойств ВПН Нюрольской и Среднеvasюганской фациальных зон показывает, что нефти в Нюрольской зоне обладают высокой вязкостью, более высоким содержанием серы и асфальтенов, значительным, но меньшим содержанием парафинов и смол по сравнению со Среднеvasюганской (табл. 4).

При рассмотрении выборки ВПН в разрезе отложений Томской области можно отметить снижение усредненных показателей плотности вниз по разрезу юры и их возрастание в палеозое (табл. 5).

Таблица 4. Физико-химические свойства ВПН Нюрольской и Среднеvasюганской фациальных зон на территории Томской области**Table 4.** Physicochemical properties of VPO of Nyurolskaya and Srednevasyuganskaya facial area in Tomsk region

Показатели нефти Oil indices		Нюрольская Nyurolskaya		Среднеvasюганская Srednevasyuganskaya	
		фациальная зона/facial area			
		Объем выборки Sample size	Среднее значение Average value	Объем выборки Sample size	Среднее значение Average value
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³		29	0,8497	1	0,8592
Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at °С, mm ² /s		29	497,52	2	46,42
Содержание, мас. % Content of, wt. %	серы sulfur	17	0,72	1	0,40
	парафинов paraffins	29	10,22	2	11,25
	смола resins	29	4,18	2	6,30
	асфальтенов asphaltenes	28	1,30	2	0,65

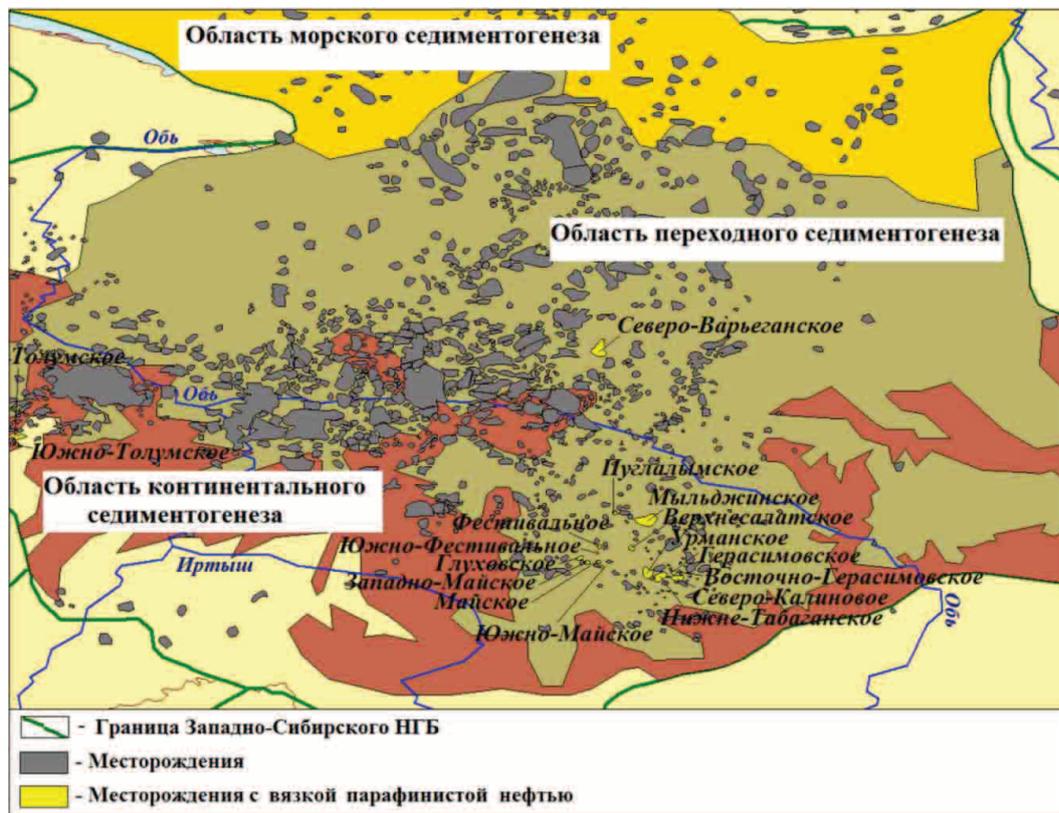


Рис. 2. Схема фациального районирования юго-востока Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна [27] с выделением месторождений ВПН

Fig. 2. Diagram of facial classification of south-east of Western-Siberian oil-and-gas bearing basin [27] with VPO fields



Рис. 3. Схема фациального районирования Томской области [27, 20] с указанием месторождений ВПН

Fig. 3. Diagram of facial classification of Tomsk region [27, 20] with VPO fields

Таблица 5. Распределение ВПН Томской области по возрасту вмещающих отложений**Table 5.** VPO distribution in Tomsk region according to the enclosing deposits

Возраст (система), обозначение Age (system), symbol	Количество образцов ВПН Number of VPO samples	Количество месторождений с ВПН Number of deposits with VPO	Месторождения Fields
Верхнеюрская, J ₃ Verkhneurskaya, J ₃	3	2	Западно-Майское, Нижне-Табаганское Zapadno-Mayskoe, Nizhne-Tabaganskoe
Среднеюрская, J ₂ Sredneyurskaya, J ₂	4	3	Восточно-Герасимовское, Герасимовское, Фестивальное Vostochno-Gerasimovskoe, Gerasimovskoe, Festivalnoe
Нижнеюрская, J ₁ Nizhneyurskaya, J ₁	5	5	Верхнесалатское, Герасимовское, Западно-Майское, Майское, Южно-Фестивальное Verkhnesalatskoe, Gerasimovskoe, Zapadno-Mayskoe, Mayskoe, Yuzno-Festivalnoe
Палеозой, Pz Paleozoic, Pz	9	4	Герасимовское, Северо-Калиновое, Урманское, Фестивальное Gerasimovskoe, severo-Kalinovoe, Urmanskoe, Festivalnoe

Для изученного разреза (юра–палеозой) отмечена тенденция увеличения содержания парафинов в нефти вниз по разрезу, но максимальным содержанием парафинов, при пониженных показателях вязкости, отличаются нефти средней юры и палеозоя. Они характеризуются также повышенным содержанием серы и смол (табл. 6).

Выводы

Проведен анализ специфики залегания и размещения вязких парафинистых нефтей юго-восто-

Таблица 6. Физико-химические свойства ВПН разных возрастов на территории Томской области**Table 6.** Physicochemical properties of VPO of different ages in Tomsk region

Показатели нефти Oil indices		Отдел/Period			
		Верхнеюрский, J ₃ Verkhneursky, J ₃	Среднеюрский, J ₂ Sredneyursky, J ₂	Нижнеюрский, J ₁ Nizhneyursky, J ₁	Палеозой, Pz Paleozoic, Pz
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³		0,8660	0,8627	0,8253	0,8709
Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at 20 °C, mm ² /s		185,23	61,93	193,58	95,23
Температура застывания, °С Pour point, °C		11,17	10,80	16,27	7,36
Содержание, мас. % Content of, wt. %	серы sulfur	0,70	0,82	0,35	0,85
	парафинов paraffins	7,60	9,03	8,77	9,89
	смол resins	4,15	4,66	2,32	6,10
	асфальтенов asphaltenes	2,09	1,55	1,29	1,41

ка Западной Сибири (Томская область). Установлено, что наиболее вязкие нефти с большим содержанием серы, парафинов, смол и асфальтенов и высоким газосодержанием залегают в пластах с высокой пластовой температурой и давлением, а их залежи расположены в области переходного седиментогенеза Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. В отличие от нефтей Волго-Уральского бассейна [20], в которых вязкость коррелирует с повышенным содержанием смол и асфальтенов, западно-сибирские вязкие нефти отличаются повышенным содержанием парафинов, а при увеличении содержания смол их вязкость снижается. Для Томской области характерна приуроченность ВПН к Нюрольской и Среднеасяганской фаціальным зонам, а в разрезе – к отложениям нижней юры и палеозоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коржубаев А. Не ждать милости от недр // Нефть России. – 2011. – № 3. – С. 18–24.
2. Кимельман С.А., Подольский Ю.В. Перспективы развития нефтедобычи в России до 2030 года // Теория и практика оценки промышленной значимости запасов и ресурсов нефти и газа в современных условиях: сб. матер. науч.-практ. конф. – СПб., 4–8 июля 2011 г. – СПб.: ВНИГРИ, 2011. – С. 59–68.
3. Нефть новой России. Ситуация, проблемы, перспективы / под общ. ред. В.Ю. Алекперова. – М.: Древлехранилище, 2007. – 688 с.
4. Гарушев А.Р. О роли высоковязких нефтей и битумов как источнике углеводородов в будущем // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 3. – С. 65–67.
5. Гарушев А.Р. О ключевой роли высоковязких нефтей и битумов как источников углеводородов в будущем // Технологии нефти и газа. – 2010. – № 1. – С. 31–34.
6. Максудов Р., Орлов Г., Осипов А. Освоение запасов высоковязких нефтей в России // Технологии ТЭК. – 2005. – № 6. – С. 36–40.
7. Халимов Э.М. Геотехнологии разведки и разработки нефтяных месторождений // Избранные труды (1958–2000 гг.). – М.: ИГиРГИ, 2001. – 656 с.
8. Халимов Э.М. Концепция дифференцированной ставки налога на добычу полезных ископаемых // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2004. – № 11. – С. 44–50.
9. Лукьянов Э.Г., Тренин Ю.А., Деревягин А.А. Достоверность геолого-геофизической информации для оценки извлекаемых (рентабельных) запасов нефти // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 1. URL: http://ogbus.ru/authors/Lukyaynov/Lukyaynov_1.pdf (дата обращения: 26.05.2014).
10. Хафизов Ф.З. Анализ запасов нефти / науч. ред. А.Э. Конторович. – Тюмень: ИД «ИздатНаукаСервис», 2011. – 228 с.
11. Антониади Д.Г., Кошелев А.Т., Пустовой П.А. Проблемы повышения добычи нефти в условиях месторождений России // Нефть. Газ. Новации. – 2010. – № 12. – С. 60–63.
12. Vartivarian D., Andrawis H. Delayed coking schemes are most economical for heavy-oil upgrading // Oil & Gas Journal. – 2006. – № 6. – P. 52–56.
13. Speight J.G. The Desulfurization of Heavy Oils and Residua. 2nd ed., revised and expanded. – Laramie, Wyoming: Marcel Dekker, Inc., 1999. – 459 p.
14. The occurrence of ultra-deep heavy oils in the Tabei Uplift of the Tarim Basin, NW China / Guangyou Zhu, Shuichang Zhang, Jin Su et al. // Organic Geochemistry. – 2012. – № 52. – P. 88–102.
15. Meyer R.F., Medaisko G.S. Heavy Oil Natural Bitumen Deposits of Latin America. – New York: Department of the Interior U.S. Geological Survey, 1991. – 33 p.
16. Якуцели В.П., Петрова Ю.Э., Суханов А.А. Динамика доли относительного содержания трудноизвлекаемых запасов нефти в общем балансе // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2007. – Т. 2. URL: <http://www.ngtp.ru/rub/6/006.pdf> (дата обращения: 02.06.2014).
17. Пуртова И.П., Вариченко А.И., Шпуров И.В. Трудноизвлекаемые запасы нефти. Терминология. Проблемы и состояние освоения в России // Наука и ТЭК. – 2011. – № 6. – С. 21–26.
18. Ибраев В.И. Прогнозирование напряженного состояния коллекторов и флюидоупоров нефтегазовых залежей в Западной Сибири. – Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2006. – 208 с.
19. Лисовский Н.Н., Халимов Э.М. О классификации трудноизвлекаемых запасов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2009. – № 6. – С. 33–35.
20. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и закономерности размещения / под ред. А.А. Новикова. – Томск: В-Спектр, 2014. – 154 с.
21. Распространение высоковязких нефтей в отложениях нижней юры и фундамента юго-востока Западной Сибири / Н.А. Красноярова, О.В. Серебренникова, С.В. Писарчук, Ву Ван Хай // Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа: Матер. V Всерос. научно-практ. конф. – Томск, 21–24 сентября 2010. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. – С. 287–288.
22. Красноярова Н.А., Серебренникова О.В., Зайцев С.П. Особенности состава органического вещества мезозоя юго-востока Западной Сибири (параметрические скважин Восток-1, Восток-3, Вездеходная-4) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2011. – № 4. – С. 37–43.
23. Яценко И.Г. Физико-химические свойства трудноизвлекаемых нефтей в зависимости от содержания парафинов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 6. – С. 39–48.
24. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Особенности физико-химических свойств трудноизвлекаемых нефтей и условий их залегания // Газовая промышленность. – 2013. – № 696. – Спецвыпуск. – С. 45–49.
25. ГОСТ Р 51858. 2002. Нефть. Общие технические условия. Введен в 2002 г. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001.
26. Серебренникова О.В., Красноярова Н.А., Филиппова Т.Ю. Взаимосвязь состава и содержания алканов и металлопорфиринов нефтей и ОВ пород юго-востока Западной Сибири как отражение условий формирования нефтематеринских толщ // Нефтехимия. – 2003. – Т. 43. – № 3. – С. 145–149.
27. Геологическое строение и нефтегазоносность нижней – средней юры Западно-Сибирской провинции / Ф.Г. Гурари, В.П. Девятков, В.И. Демин и др. – Новосибирск: Наука, 2005. – 156 с.

Поступила 06.06.2014 г.

UDC 553.982

AREA AND CROSS-SECTION DISTRIBUTION OF VISCOUS WAXY OILS IN DEPOSITS LOCATED IN THE SOUTHEAST OF WEST SIBERIA

Natalya A. Krasnoyarova,

Cand. Sc., Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia; National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: natalex@ipc.tsc.ru

Irina G. Yashchenko,

Cand. Sc., Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: sric@ipc.tsc.ru

Olga V. Serebrennikova,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: ovs@ipc.tsc.ru

The paper considers the resource potential of viscous waxy oils occurring in the southeast of West Siberia, Tomsk region in particular. Now the study of such oils is the extremely urgent issue caused by the large-scale development of difficult-to-recover oil reserves. The authors have obtained the data on composition and properties of oils from new wells in Tomsk region. The database of oils at the Institute of Petroleum Chemistry SB RAS was supplemented with descriptions of the properties of 16 oils from the wells of Mayskoye, Sredne-, Zapadno- and Yuzhno-Mayskoye oilfields located in Festivalnaya, Vostochno- and Yuzhno-Festivalnaya areas and of 3 oils from Kiev-Eganskoe oilfield. By physicochemical properties (density at 20 °C, viscosity at 20 and 50 °C, congelation point, sulfur and paraffin contents and yields of distillate fractions at 200 and 300 °C) the oils were estimated and classified according to the specifications to oils coming into the pipeline transportation system for subsequent export. The obtained geochemical characteristics of oils on composition of n-alkanes testify to oxidative, less often sub-oxidative conditions for accumulation of oil-generating organic matter and to a wide range of oils thermal transformation (from slight to significant). The specificity of occurrence and location of viscous waxy oils in the southeast of West Siberia was analyzed. It was ascertained that the deposits of the most viscous oils with high sulfur, paraffin, resin and asphaltene contents and high gas content are located in the area of the basin transition sedimentogenesis. The analysis of the specific occurrence and location enables one to give correct prediction of spatial zoning and detection of viscous waxy oils.

Key words:

Viscous waxy oils, physicochemical oil properties, geochemical characteristics of oils, age of oil-enclosing rocks, West Siberian oil-and-gas bearing basin.

REFERENCES

1. Korzhubaev A. Ne zhdat milosti ot neдр [Do not wait for favors from the subsoil]. *Neft Rossii*, 2011, no. 3, pp. 18–24.
2. Kimelman S.A., Podolsky Yu.V. Perspektivy razvitiya nefte-dobychi v Rossii do 2030 goda [Prospects for the development of oil production in Russia up to 2030]. *Teoriya i praktika otsenki promyshlennoy znachimosti zapasov i resursov nefti i gaza v sovremennykh usloviyakh. Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and Practice of Industrial importance of reserves and resources of oil and gas in modern conditions. Proc. of scientific conference]. St-Petersburg, 4–8 July 2011. St-Petersburg, VNIGRI Publ., 2011. pp. 59–68.
3. Neft novoy Rossii. Situatsiya, problemy, perspektivy [Oil the new Russia. Situation, Problems and Prospects]. Ed. by V.Yu. Alekperov. Moscow, Drevlekhranilishche publ., 2007. 688 p.
4. Garushev A.R. O roli vysokoviyazkikh neftey i bitumov kak istochnike uglevodorodov v budushchem [On the role of high-viscosity oils and bitumens as a source of hydrocarbons in the future]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2009, no. 3, pp. 65–67.
5. Garushev A.R. O klyuchevoy roli vysokoviyazkikh neftey i bitumov kak istochnikov uglevodorodov v budushchem [On the role of high-viscosity oils and bitumens as a source of hydrocarbons in the future]. *Tekhnologii nefti i gaza*, 2010, no. 1, pp. 31–34.
6. Maksutov R., Orlov G., Osipov A. Osvoenie zapasov vysokoviyazkikh neftey v Rossii [The development of high-viscosity oil reserves in Russia]. *Tekhnologii TJeK*, 2005, no. 6, pp. 36–40.
7. Khalimov E.M. *Geotekhnologii razvedki i razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy. Izbrannyye trudy (1958–2000 gg.)* [Geotechnology of exploration and development of oil fields]. Moscow, IGI RGI Publ., 2001. 656 p.
8. Khalimov E.M. Kontseptsiya differentsirovannoy stavki naloga na dobychu poleznykh iskopaemykh [The concept of differentiated tax rate on mining mineral]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2004, no. 11, pp. 44–50.
9. Lukyanov E.G., Trenin Yu.A., Derevyagin A.A. Dostovernost geologo-geofizicheskoy informatsii dlya otsenki izvlekaemykh (rentabelnykh) zapasov nefti [Reliability of geological and geophysical information for oil reserves evaluation]. *Neftegazovoe delo*, 2008, no. 1. Available at: http://ogbus.ru/authors/Lukyanov/Lukyanov_1.pdf (accessed 26 May 2014).
10. Khafizov F.Z. *Analiz zapasov nefti* [Analysis of oil reserves]. Ed. by A.E. Kontorovich. Tyumen, IzdatNaukaServis Publ. House, 2011. 228 p.
11. Antoniadi D.G., Koshelev A.T., Pustovoy P.A. Problemy povysheniya dobychi nefti v usloviyakh mestorozhdeniy Rossii [The issue of improving oil production at the oilfields of Russia]. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2010, no. 12, pp. 60–63.

12. Vartivarian D., Andrawis H. Delayed coking schemes is most economical for heavy-oil upgrading. *Oil & Gas Journal*, 2006, no. 6, pp. 52–56.
13. Speight J.G. *The Desulfurization of Heavy Oils and Residua*. 2nd ed., revised and expanded. Laramie, Wyoming, Marcel Dekker, Inc., 1999. 459 p.
14. Guangyou Zhu, Shuichang Zhang, Jin Su. The occurrence of ultra-deep heavy oils in the Tabei Uplift of the Tarim Basin, NW China. *Organic Geochemistry*, 2012, no. 52, pp. 88–102.
15. Meyer R.F., Medaisko G.S. *Heavy Oil Natural Bitumen Deposits of Latin America*. New York, Department of the Interior U.S. Geological Survey, 1991. 33 p.
16. Yakutseni V.P., Petrova Yu.E., Sukhanov A.A. Dinamika doli otositelnogo sodержaniya trudnoizvlekaemykh zapasov nefiti v obshchem balance [Dynamics of the share of the relative content of hard-to-recover oil reserves in balance reserves]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2007, vol. 2. Available at: <http://www.ngtp.ru/rub/6/006.pdf> (accessed 02 June 2014).
17. Purtova I.P., Varichenko A.I., Shpurov I.V. Trudnoizvlekaemye zapasy nefiti. Terminologiya. Problemy i sostoyanie osvoeniya v Rossii [The reserves of hard-to-recover oil. Terminology. Problems and the state of development in Russia]. *Nauka i TJeK*, 2011, no. 6, pp. 21–26.
18. Ibraev V.I. *Prognozirovanie napryazhennogo sostoyaniya kollektorov i flyuidoporov neftegazovykh zalezhey v Zapadnoy Sibiri* [Prediction of the stress state of collectors and immobile fluid of oil and gas deposits in Western Siberia]. Tyumen, Tyumen Publ. House, 2006. 208 p.
19. Lisovsky N.N., Khalimov E.M. O klassifikatsii trudnoizvlekaemykh zapasov [Classification of difficult oil]. *Vestnik CKR Rosnedra*, 2009, no. 6, pp. 33–35.
20. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. *Trudnoizvlekaemye nefiti: fiziko-khimicheskie svoystva i zakonomernosti razmeshcheniya* [Hard-to-oil: physico-chemical properties and patterns of distribution]. Ed. by A.A. Novikov. Tomsk, V-Spektr Publ., 2014. 154 p.
21. Krasnoyarova N.A., Serebrennikova O.V., Pisarchuk S.V., Vu Van Hay. Rasprostranenie vysokovyzkikh neftey v otlozheniyakh nizhney yury i fundamenta yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri [Distribution of high-viscosity oil in the sediments of the Lower Jurassic and the Foundation of the southeast of Western Siberia]. *Dobycha, podgotovka, transport nefiti i gaza: Materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Production, treatment, oil and gas transport. Proc. of V All-Russian scientific conference]. Tomsk, 21–24 September 2010. Tomsk, IOA SO RAN Publ., 2010. pp. 287–288.
22. Krasnoyarova H.A., Serebrennikova O.V., Zaytsev S.P. Osobnosti sostava organicheskogo veshchestva mezozoya yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri (parametricheskie skvazhiny Vostok-1, Vostok-3, Vezdekhodnaya-4) [Features of the organic matter of the Mesozoic southeast of Western Siberia (parametric wells Vostok 1, Vostok-3, all-terrain-4)]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefityanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2011, no. 4, pp. 37–43.
23. Yashchenko I.G. Fiziko-khimicheskie svoystva trudnoizvlekaemykh neftey v zavisimosti ot sodержaniya parafinov [Dependence of physical and chemical properties of hardly recoverable oils on paraffin content]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefityanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2010, no. 6, pp. 39–48.
24. Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Osobennosti fiziko-khimicheskikh svoystv trudnoizvlekaemykh neftey i uslovy ikh zaleganiya [Features of physical and chemical properties of hard-to-recover oils and conditions of occurrence]. *Gazovaya promyshlennost*, 2013, no. 696, Special Issue, pp. 45–49.
25. *GOST R 51858. 2002. Neft. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Oil. General specifications]. Moscow, Gosstandart Rossii: Izd-vo standartov, 2001.
26. Serebrennikova O.V., Krasnoyarova N.A., Filippova T.Yu. Vzaimosvyaz sostava i sodержaniya alkanov i metalloporfirinov neftey i OV porod yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri kak otrazhenie uslovy formirovaniya neftematerinskikh tolshch [Relationship of composition and content of alkanes and metalloporphyrins oils and extract rocks in southeast of Western Siberia as a reflection of the conditions of formation of source sequences]. *Neftekhimiya*, 2003, vol. 43, no. 3, pp. 145–149.
27. Gurari F.G., Devyatov V.P., Demin V.I. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost nizhney – sredney yury Zapadno-Sibirskoy provintsii* [Geological feature and petroleum potential lower – middle Jurassic West Siberian province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 156 p.

Received: 06 June 2014.

УДК 622.243

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ШАРОШЕЧНЫМИ ДОЛОТАМИ

Нескоромных Вячеслав Васильевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники
разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий
Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск,
пр. Свободный, 79/10. E-mail: sovair@bk.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью решения проблемы управления направлением скважин при бурении.

Цель работы: получить аналитические зависимости для определения дестабилизирующего работу шарошечного долота опрокидывающего момента, возникающего при разрушении анизотропной горной породы, и установить аналитическую связь особенностей конструкции долота с величиной данного силового фактора.

Методы исследования: анализ результатов экспериментальных работ по механике разрушения анизотропных горных пород буровыми долотами и инденторами различной формы, аналитические исследования процесса разрушения горных пород, сопоставление и анализ сходности полученных данных и формул.

Результаты. Установлено, что одним из основных силовых факторов, вызывающих искривление скважин при разрушении анизотропных горных пород является опрокидывающий момент, вызванный неравенством упругих и прочностных свойств горных пород. Величина этого момента определяется величиной осевого усилия, размером и формой породоразрушающих элементов, а также параметрами анизотропии физико-механических свойств горной породы и углом встречи бурового инструмента со слоями горной породы.

Величина опрокидывающего момента при разрушении анизотропной горной породы шарошечным долотом изменяется за один оборот вращения долота на забое, при этом число максимальных и минимальных значений, а также их амплитуда колебаний зависит от числа шарошек долота и угла наклона осей вращения шарошек по отношению к забою скважины. Отмеченная особенность колебаний величины опрокидывающего момента может использоваться при проектировании компоновок буровой колонны с целью минимизации влияния опрокидывающего момента на искривление скважин, буримых в анизотропных горных породах.

Процесс искривления скважин в анизотропных породах, буримых шарошечными долотами, определяется механизмом разрушения горных пород и его особенностями, к которым следует отнести двойственный характер породоразрушающего действия – раздавливание породы осевой силой и дробление-скалывание породы косым ударом, который наносится под углом к забою, а также некоторые конструктивные особенности вооружения долот.

К особенностям вооружения шарошечных долот, влияющих на процесс разрушения анизотропной горной породы и появления опрокидывающего момента, можно отнести форму и размеры породоразрушающих вставок, угол их приотстреления, а также схему установки породоразрушающих вставок в венцах шарошек долота.

Ключевые слова:

Горная порода, бурение, шарошечные долота, поле механических напряжений, искривление скважин.

Процесс разрушения анизотропных горных пород при бурении сопровождается искривлением стволов скважин, разрушением керна, снижением производительности бурения. Механизм искривления скважин, благодаря исследованиям отечественных и зарубежных специалистов, определен как комплекс причин, задающих неравномерное разрушение забоя и стенок скважины. Новые данные о влиянии анизотропии горных пород на искривление скважин, форму сечения ствола скважины и другие показатели приведены в работе [1], в которой обобщены научные результаты исследований по материалам бурения Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3).

В работе убедительно показана тесная связь показателя анизотропии по упругости с формой сечения ствола и разработанностью ствола по диаметру, а также показано мощное влияние анизотропии горных пород на процесс формирования основного и вновь зарезаемых стволов скважины. В интервалах залегания анизотропных пород скважины могут иметь максимальную разработанность и овальность ствола, а параметры последней (соотно-

шение длин осей овала) часто согласуются с показателем анизотропии.

С.С. Сулакшин [2], Ю.А. Боярко [3], А. Лубинский и Г. Вудс [4], Ю.Т. Морозов [5], А.Г. Калинин [6], В. Бредли [7], В.В. Кривошеев [8], А.Е. Колесников [9, 10], Л.Г. Шолохов [11], В.П. Зиненко [12, 13] в своих работах показали, что анизотропия является основным фактором, обуславливающим искривление, а процесс набора кривизны определяется тем, что анизотропная порода оказывает максимальное сопротивление разрушению вдоль слоистости или сланцеватости, а минимальное – в перпендикулярном направлении. Последнее направление рядом специалистов [2, 3, 5, 9, 10, 12] называется линией наименьшего сопротивления (ЛНС) породы. Во всех промежуточных направлениях величина сопротивления оказывается заключенной между указанными экстремальными значениями. В названных работах индивидуально не рассматриваются особенности искривления скважин при бурении анизотропных горных пород шарошечными долотами.

В. Бредли [7], развивая ранее сформулированные положения теории Р. Макламора (1971 г.) о

механизме искривления скважин в анизотропных породах под действием боковой силы F_d , провел экспериментальные работы по определению названной силы, действующей на буровой инструмент. Возникновение боковой отклоняющей силы P . Макламор объяснил, рассматривая процесс взаимодействия реза инструмента и борта лунки разрушения в породе.

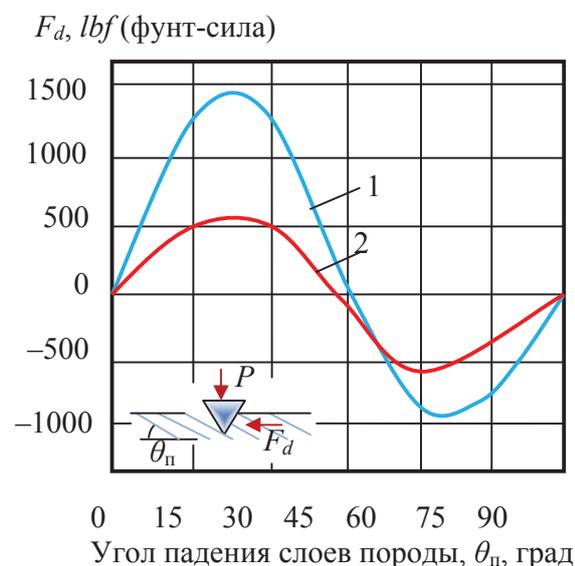


Рис. 1. Экспериментальные зависимости отклоняющей силы F_d от угла падения слоев породы (сланец Green River), по В. Бредли, для клиновидного индентора с углами приострения: 1) 60°; 2) 30°

Fig. 1. Experimental dependences of deflecting force F_d on a slope angle of rock layers (Green River shale), according to V. Bredley, for V-type indenter with a cutting angle: 1) 60°; 2) 30°

На рис. 1 воспроизведен график зависимости $F_d=f(\theta_n)$ из работы В. Бредли. Графики получены для клиновидных резов шарошечного долота с углами приострения 60 и 30° (кривые соответственно 1 и 2) при их внедрении в породу на глубину 3,8 мм. Верхняя часть графиков дает значения силы F_d , действующей в направлении отклонения ствола скважины вкrest простирания (положительные значения), нижняя – вниз по падению слоев породы (отрицательные значения). Можно отметить, что в соответствии с условиями эксперимента осевые усилия нагружения инденторов были различны, отличались и размеры полей упруго-пластической деформации породы под индентором с различными углами приострения.

Следует отметить, что характер кривых на рис. 1 в целом согласуется с фактическими закономерностями естественного искривления скважин, согласно которым при углах встречи меньше критических стволы скважин в анизотропных породах отклоняются в направлении падения слоев, а при углах встречи больше критического значения – вкrest простирания слоев породы. То есть может происходить изменение направления искривления скважин в зависимости от угла встречи оси бурово-

го инструмента и напластования горных пород [2, 4, 5, 9, 10 и др.]. В то же время, если придерживаться теории Р. Макламора, которую поддерживает В. Бредли, объяснить характер кривых, а именно, их синусоидальность со сменой направления действия боковой силы, вряд ли удастся, так как нельзя выявить причину смены направления отклоняющей силы и дать объяснение природы критического угла встречи. Многочисленные исследования [2, 10, 8] показали, что происходит опережающий скол борта лунки разрушения вдоль слоистости или сланцеватости породы независимо от угла встречи со слоями, а это предполагает постоянство направления силы F_d в сторону восстания слоев породы. Очевидно, что природа явления искривления скважин в анизотропных породах является более сложной, а при исследовании природы этого явления следует учитывать как разнообразие физико-механических свойств анизотропных пород, так и особенности механики разрушения горных пород теми или иными способами бурения и типами породоразрушающих инструментов.

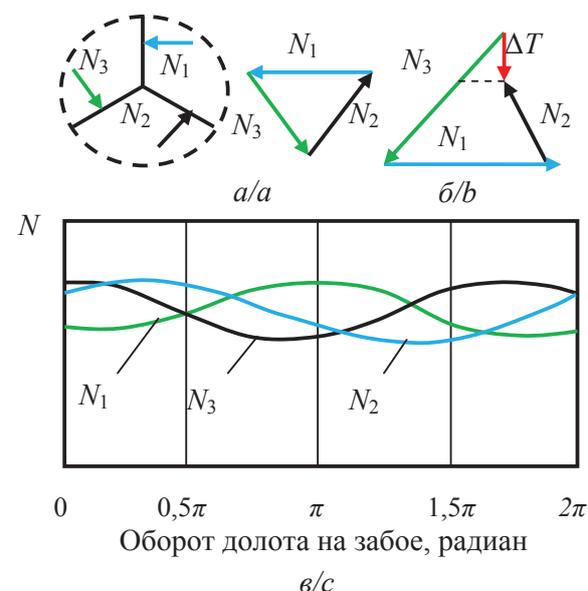


Рис. 2. Схемы векторов и графики усилий сопротивлений разрушению породы шарошками трехшарошечного долота при бурении: а) изотропной породы (геометрическая сумма сил сопротивления равна нулю); б) анизотропной породы (геометрическая сумма сил равна ΔT); в) графики усилий сопротивления разрушению N_1, N_2, N_3 , полученные экспериментально за один оборот долота на забое

Fig. 2. Diagrams of vectors and force graphs of three-cone bit cone rollers resistance to rock destruction when drilling: a) isotropic rock (vector sum of resistance force equals zero); b) anisotropic rock (vector force sum equals ΔT); c) force graphs of destruction resistance N_1, N_2, N_3 obtained experimentally per one turn of a chisel on a face

Результаты исследований В. Бредли [7] позволяют сделать вывод о том, что значение напряженного состояния породы при разрушении, а также размер области упруго-пластического деформирования породы задают значение дестабилизиру-

щей силы, действующей на инструмент. Так, для реза с углом приострения 60° усилие так называемой боковой силы F_d оказалось выше, чем для реза с меньшим углом приострения.

Результаты экспериментальных исследований [14–16] отклоняющей силы, возникающей при взаимодействии трехшарошечного долота с анизотропной горной породой, показали некоторые особенности процесса, характерные для данного типа бурового инструмента. Измерения были выполнены на стенде с тензометрическими датчиками усилия сопротивления разрушению породы на каждой шарошке и показали, что если при бурении изотропной породы силы сопротивлений на каждой шарошке равны между собой, а их результирующая равна нулю в любой момент времени углубления скважины (рис. 2, а), то при бурении анизотропной породы это соотношение сил сопротивления не выполняется, результирующая сила не равна нулю и выполняет роль отклоняющего усилия ΔT , смещающего долото от первоначальной траектории поступательного движения с каждым новым оборотом долота вокруг оси вращения (рис. 2, б). При этом, очевидно, меняется и кинематическая характеристика работы долота, например, увеличивается эффект проскальзывания шарошек по забою. На графиках (рис. 2, в) даны кривые усилий N_1, N_2, N_3 на каждой из трех шарошек за один оборот вращения долота на забое. Из графиков следует, что величина сопротивления разрушению породы на каждой шарошке изменяется с периодом в половину оборота долота на забое.

Стендовые исследования [11–13] показали повышение отклоняющей силы по мере роста диаметра долота, а максимум этой силы получен при угле встречи слоев породы и оси инструмента, равном примерно 70° . При повышении числа и размеров породоразрушающих вставок на шарошках долота величина отклоняющей силы увеличивается, что согласуется с данными В. Бредли [7]. При работе шарошечного долота наблюдаются также колебания величины отклоняющей силы, частота которых связана с числом шарошек долота.

Рассмотрим теорию разрушения анизотропных горных пород с учетом особенностей конструкции и механизма разрушения породы шарошечными долотами.

Основные особенности механизма разрушения анизотропных горных пород определены их неравнопрочностью в различных направлениях [17, 18]. Как правило, анизотропные горные породы – слоистые, сланцеватые или обладающие флюидальностью – имеют более высокие значения упругости и твердости в направлении сформировавшихся слоев горной породы, т. е. для основной части анизотропных горных пород справедливо следующее соотношение:

$$E^{\parallel} / E^{\perp} > 1,$$

где E^{\parallel}, E^{\perp} – модули упругости горной породы вдоль и перпендикулярно слоям, сланцеватости или флюидальности, соответственно, Па.

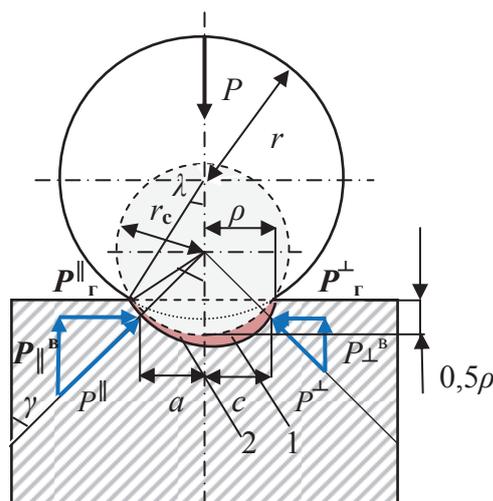


Рис. 3. Схема для анализа процесса деформирования и разрушения анизотропной породы шаровым индентором: 1) контур внедренного в породу индентора; 2) контур ядра сжатия в породе

Fig. 3. Diagram for analysis of anisotropic rock deformation and destruction by a ball indenter: 1) contour of the indenter introduced into the rock; 2) contour of a compressing kernel in the rock

Для анизотропных горных пород в основном выполняется следующее соотношение деформационных характеристик в соответствии с законом Р. Гука [19]:

$$\xi^{\parallel} = \sigma / E^{\parallel} > \xi^{\perp} = \sigma / E^{\perp}, \quad (1)$$

где ξ^{\parallel} и ξ^{\perp} – относительная деформация породы вдоль и перпендикулярно слоям, соответственно; σ – напряжения в ядре сжатия породы, приводящие к её разрушению (образованию лунки разрушения), Па.

Как следует из формулы (1), поскольку модуль упругости анизотропной породы вдоль слоистости или сланцеватости, как правило [19], значительно превышает модуль упругости породы в перпендикулярном направлении, то для получения напряжения в породе, равного σ , анизотропная порода должна получить различную деформацию в различных направлениях относительно перпендикулярно слоистости или сланцеватости.

Таким образом, ядро сжатия для анизотропной породы может формироваться в виде эллипсоида, в отличие от случая, когда порода изотропна и ядро сжатия соответствует симметричной поверхности в виде шара [17]. При этом форма ядра будет более вытянута в направлении, перпендикулярном слоистости или сланцеватости, и сжата в направлении слоев. Подобная форма ядра сжатия приводит к выколу лунки асимметричной формы. Как следствие, подобная неравномерность деформации и разрушения породы приводит в первую очередь к искривлению ствола скважины при бурении.

На рис. 3 дана схема для анализа процесса деформирования и разрушения анизотропной породы шаровым индентором, который моделирует воздействие на породу при бурении шарообразных резцов

и породоразрушающих элементов, например шарошечных долот с вооружением типа К или ОК (для бурения твердых и очень твердых горных пород).

Область сжатия породы под индентором будет отличаться от симметричной шарообразной (линия 1) и получит вытянутость в направлении, перпендикулярном слоям породы (линия 2).

Усилие воздействия на индентор P затрачивается при деформировании породы на преодоление сил внутреннего трения в деформируемых слоях породы, а также на преодоление упругих реакций. С учетом данной формулировки упругие реакции породы P^{\parallel} и P^{\perp} , направленные вдоль и перпендикулярно слоям породы и воздействующие на ядро сжатия породы (контур ядра сжатия – линия 1), можно разложить на вертикальные

$$P_{\parallel}^{\text{в}} = P \cos^2 \gamma (1 - \operatorname{tg} \varphi^{\prime\prime}), \quad (2)$$

$$P_{\perp}^{\text{в}} = P \sin^2 \gamma (1 - \operatorname{tg} \varphi^{\perp}) \quad (3)$$

и горизонтальные составляющие

$$P_{\parallel}^{\text{г}} = P \sin \gamma \cos \gamma (1 - \operatorname{tg} \varphi^{\prime\prime}), \quad (4)$$

$$P_{\perp}^{\text{г}} = P \sin \gamma \cos \gamma (1 - \operatorname{tg} \varphi^{\perp}), \quad (5)$$

где γ – угол между направлением приложения усилия P и плоскостями слоев, град; $\varphi^{\prime\prime}, \varphi^{\perp}$ – углы внутреннего трения соответственно в направлении слоев породы и перпендикулярно им, град.

Из формул (2)–(5) следует, что при вдавливании индентора в анизотропную породу в процессе её упругого деформирования на торец индентора оказывают действие неуравновешенные реакции породы. Действие вертикальных реакций, точки приложения которых находятся на расстоянии a и c от оси индентора, можно привести к действию опрокидывающего момента $M_{\text{он}}$:

$$M_{\text{он}} = P_{\parallel}^{\text{в}} a - P_{\perp}^{\text{в}} c. \quad (6)$$

В соответствии с [18], формула (6) для расчета $M_{\text{он}}$ для плоского цилиндрического индентора имеет следующий вид:

$$M_{\text{он}} = Pr \begin{bmatrix} \cos^2 \sin \gamma \sqrt{\frac{1}{K}} (1 - \operatorname{tg} \varphi^{\prime\prime}) - \\ - \sin^2 \gamma \cos \gamma \sqrt{K} (1 - \operatorname{tg} \varphi^{\perp}) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где P – осевое усилие на внедряемый в породу индентор, Н; r – радиус торца цилиндрического индентора, м; K – коэффициент анизотропии горной породы, определяемый по соотношению модулей упругости вдоль слоев и перпендикулярно слоям горной породы.

В отличие от цилиндрического индентора с плоским торцом, для которого получена формула (7), глубина возникновения максимальных касательных напряжений под шаровым индентором будет равна $0,5\rho$ – половине радиуса пятна контакта индентора с породой (рис. 3), что определяет как размер ядра сжатия, так и глубину формируемой лунки разрушения в породе.

Определим $M_{\text{он}}$ относительно центра ядра сжатия породы, согласно уравнению (6).

Из схемы, приведенной на рис. 4, следует, что радиус ядра сжатия породы равен $r_c = \frac{\rho}{\sin \lambda}$ а рас-

стояния c и a соответственно равны $r_c \cos \gamma$ и $r_c \sin \gamma$.

Угол λ к моменту пластического деформирования породы, а именно когда глубина максимальных касательных напряжений под индентором соответствует значению $0,5\rho$, равен $51-53^\circ$. С учетом этого $r_c = 1,25\rho$, а $M_{\text{он}}$ для индентора в форме шара, внедряющегося в анизотропную породу, определится из зависимости:

$$M_{\text{он}} = 1,25 P \rho F(\gamma), \quad (8)$$

где $F(\gamma)$ – функция главного вектора $M_{\text{он}}$ от угла встречи γ , равная выражению в квадратных скобках из формулы (7).

Зависимость ρ от глубины внедрения индентора в породу h в формуле (8) можно определить из формулы

$$\rho = \sqrt{dh + h^2},$$

где d – диаметр сферического торца внедряемого в породу индентора, м.

Отмеченные особенности механизма разрушения анизотропных горных пород приводят к перекосу внедряемых в породу инденторов – резцов бурового инструмента, самого бурового инструмента, повышению объема разрушаемой породы и соответственно повышенному износу инструмента, снижению выхода керна, вызывают естественное искривление стволов скважин.

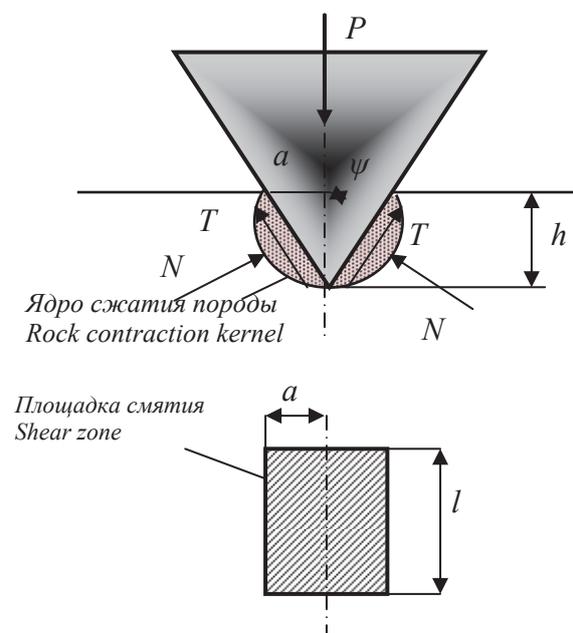


Рис. 4. Схема для определения глубины внедрения в породу клиновидного индентора

Fig. 4. Diagram for determining the depth of V-type indenter introduction into the rock

Полагая, что шаровой индентор вполне точно моделирует процесс упруго-пластического деформирования породы отдельными резцами бурового инструмента, получена зависимость для расчета опрокидывающего момента, действующего на торец бурового инструмента, оснащенного шарообразными породоразрушающими вставками:

$$M_{он} = 1,25P_{ос}F(\gamma)\sqrt{dh + h^2}, \quad (9)$$

где $P_{ос}$ – осевая нагрузка на буровой инструмент, кН;

$$h_{ш} = \frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2}{4} - \frac{P_{ос}}{\pi N p_{ш}(1 + \operatorname{tg} \varphi)}} - \text{глубина внедрения}$$

шарообразной породоразрушающей вставки в породу, м; d – диаметр породоразрушающей вставки, м; $p_{ш}$ – твердость анизотропной горной породы, измеренная в направлении приложения осевой силы P , Па; N – количество породоразрушающих вставок бурового инструмента, одномоментно опирающихся на забой; φ – угол внутреннего трения в слоях породы при деформировании, измеренный в направлении приложения осевой силы P , град.

С целью получения формулы для расчета опрокидывающего момента, действующего на клиновидный индентор, по форме, соответствующей форме вставок, которыми оснащаются шарошечные долота типа М, С (для бурения мягких горных пород и горных пород средней твердости), рассмотрим процесс его вдавливания (рис. 4) в породу. Ядро сжатия породы формируется на боковых поверхностях индентора. По аналогии с решением при получении формулы для расчета $M_{он}$, действующего на клиновидный индентор, решение будет выглядеть следующим образом:

$$M_{он} = PaF(\gamma) = Ph_k \operatorname{tg} \psi F(\gamma), \quad (10)$$

где P – осевая нагрузка на индентор, кН; a – ширина площадки смятия под индентором, м; ψ – половина угла приострения индентора, град; h_k – глубина внедрения индентора в породу, м.

В работе [20] определена глубина внедрения клиновидного индентора в породу, которую можно использовать при расчете значения $M_{он}$:

$$h_k = \frac{P}{2 p_{ш} \operatorname{tg} \psi (\mu \cos \psi + \sin \psi) (1 + \operatorname{tg} \varphi)}, \quad (11)$$

где $p_{ш}$ – твердость анизотропной горной породы, измеренная в направлении приложения осевой силы P , Па; l – ширина индентора, м; φ – угол внутреннего трения в слоях породы при деформировании, измеренный в направлении приложения осевой силы P , град; μ – коэффициент трения индентора о породу, измеренный в направлении приложения осевой силы P .

Анализ полученных зависимостей (10) и (11) и сравнение данных эксперимента, опубликованных в работе [7], показывают, что значение $M_{он}$ для индентора с углом приострения 60° оказалось больше в 1,5–2,4 раза, в сравнении с индентором, у которого угол приострения 30° при условии равенства глубины внедрения инденторов в породу, поскольку

ку потребовалось более значительное осевое усилие на индентор для достижения глубины внедрения 3,8 мм. При этом площадка смятия горной породы была существенно больше по размеру. Следует полагать, что природа появления усилия F_d и $M_{он}$ одна и та же, а именно, вызвана анизотропией физико-механических свойств горной породы.

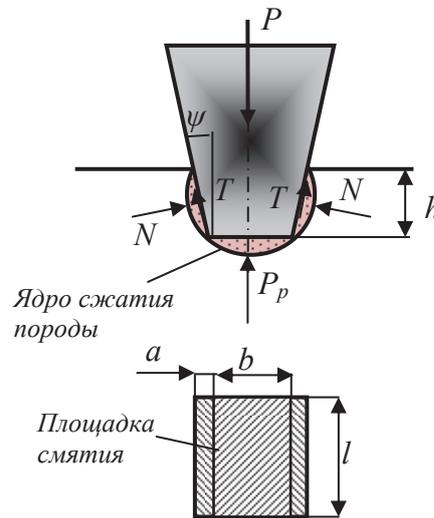


Рис. 5. Схема для определения глубины внедрения в породу клиновидного с площадкой притупления индентора

Fig. 5. Diagram for determining the depth of introduction of V-type indenter with a wear flat into the rock

Для случая, когда индентор имеет форму равнобедренной трапеции (соответствует форме породоразрушающих вставок шарошечных долот для бурения горных пород средней твердости и твердых) с плоской площадкой (например, притупления) шириной b , площадка смятия горной породы будет складываться из площадки, равной плоской части торца индентора, равной $b \cdot l$, и двух боковых площадок, смятие которых производится наклонными поверхностями индентора (рис. 5).

Формула для расчета $M_{он}$, действующего на индентор в форме равнобедренной трапеции, будет выглядеть следующим образом:

$$M_{он} = P(a + 0,5b)F(\gamma) = P(0,5b + h_t \operatorname{tg} \psi)F(\gamma), \quad (12)$$

где P – осевая нагрузка на индентор, кН; a, b – размеры торца индентора (рис. 5), м; ψ – половина угла конусности индентора, град; h_t – глубина внедрения индентора в породу, м.

В работе [20] определена глубина внедрения индентора в форму равнобедренной трапеции в породу h_t , которую можно использовать при расчете значения $M_{он}$.

$$h_t = \frac{P - bl p_{ш} (1 + \operatorname{tg} \varphi)}{2 p_{ш} \operatorname{tg} \psi (\mu \cos \psi + \sin \psi) (1 + \operatorname{tg} \varphi)}. \quad (13)$$

В формуле (13) обозначения аналогичны таковым в формулах (11) и (12).

При решении уравнений (9)–(13) твердость горной породы и коэффициент внутреннего трения рассчитываются в направлении приложения осевого усилия с учетом угла встречи оси инструмента и слоистости или сланцеватости горной породы γ . На основании решения уравнения эллипса можно рассчитать значения искомых параметров в направлении приложения осевой силы P , если известно значение параметра, аналогичное искомому, но в направлении слоев породы A'' по формуле [17]

$$A = \frac{A''}{\cos\gamma\sqrt{1 + K^2 \operatorname{tg}^2\gamma}}, \quad (14)$$

где A'' – значение искомого параметра, например твердости в направлении слоев породы; K – коэффициент анизотропии горной породы, определяемый по соотношению модулей упругости вдоль слоев и перпендикулярно слоям горной породы.

Для определения искомого параметра по формуле (14) следует в неё подставить значения угла γ , K и соответствующие значению данного параметра в направлении слоев A'' , например, значение твердости породы в направлении слоев. В результате можно рассчитать значение твердости породы в направлении приложения усилия P . Аналогично можно определить значения коэффициентов внутреннего и внешнего трения и иных параметров физико-механических свойств горной породы.

Основными силовыми факторами, определяющими кривизну и направленность скважин в анизотропных породах, являются опрокидывающий момент $M_{\text{он}}$ и отклоняющее усилие ΔT , возникающее при перекосе бурового инструмента. Данные силовые факторы обусловлены самой природой анизотропных горных пород и их полное устранение при механическом разрушении таких пород невозможно. Однако возможна, в определенной степени, нейтрализация этих силовых факторов, а именно уменьшение их дестабилизирующего действия на буровую компоновку, которое проявляется в повышении деформации компоновки, перекосе бурового инструмента, фрезеровании ствола скважины в одном преимущественном направлении.

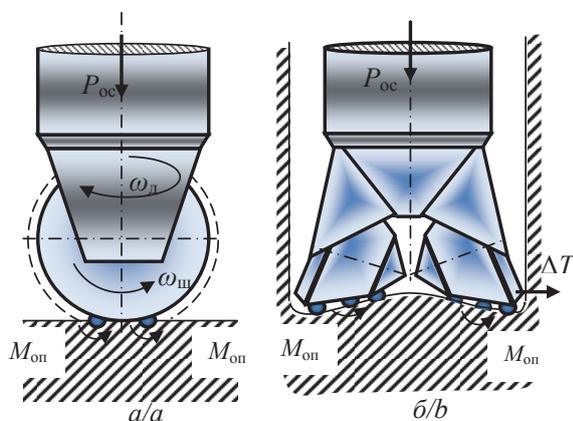


Рис. 6. Схема взаимодействия долота с анизотропной горной породой

Fig. 6. Pattern of a chisel interaction with anisotropic rock

Рассмотрим взаимодействие с анизотропной породой двухшарошечного долота в тот момент, когда ось вращения шарошек располагается вдоль линии простирания слоистости горной породы (рис. 6, а). При внедрении зубцов долота в породу на каждый из них передаются единичные опрокидывающие моменты, которые, суммируясь, воздействуют на шарошку. Однако суммарный момент $M_{\text{он}}^c$, как результат геометрического суммирования единичных моментов, на корпус долота и компоновку передается не полностью, так как шарошка установлена в долоте с возможностью вращения, а $M_{\text{он}}^c$ действует в плоскости вращения шарошек. При угле наклона оси вращения шарошек $\beta_{\text{ш}}$ менее 90° момент, передаваемый на компоновку, будет равен

$$M_{\text{он}}^k = \cos\beta_{\text{ш}} M_{\text{он}}^c. \quad (15)$$

Если оси вращения шарошек горизонтальны, то $M_{\text{он}}^c$ в момент, когда оси вращения шарошек направлены вдоль слоистости или сланцеватости, равен нулю, а значит, опрокидывающий момент на компоновку через долото не передается.

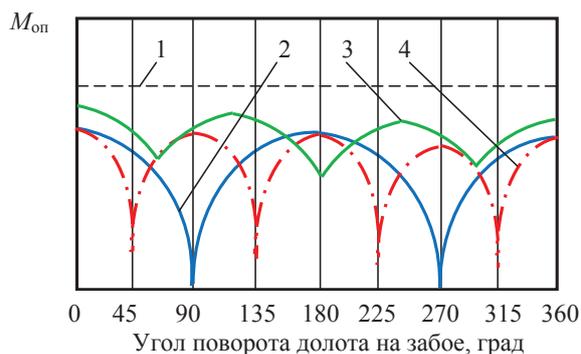


Рис. 7. Зависимости изменения величины опрокидывающего момента $M_{\text{он}}$ за один оборот долот с различным числом шарошек на забое скважины. Долото: 1) режуще-скалывающего типа с круглым торцом; 2) двухшарошечное; 3) трехшарошечное; 4) четырехшарошечное

Fig. 7. Dependence of change of overturning moment $M_{\text{он}}$ value per one turn of chisels with different number of cones on a well face. Bore bit: 1) of cutting-shearing type with round face; 2) two-cone; 3) three-cone; 4) four-cone

Таким образом, из формулы (15) понятно, что при определенном положении шарошки долота, когда ось её вращения параллельна слоям породы на забое скважины, опрокидывающий момент $M_{\text{он}}^k$ на долото через шарошку практически не передается, а значит, не наблюдается и повышение изгиба компоновки и перекоса долота на забое.

При повороте долота на забое на четверть оборота вокруг продольной оси долота из положения, соответствующего его положению на схеме рис. 6, а, $M_{\text{он}}^k = M_{\text{он}}^c$ независимо от угла наклона осей вращения шарошек, так как в этом случае направление действия опрокидывающего момента совпадает с направлением вращения шарошек.

Отмеченные особенности передачи опрокидывающего момента на шарошечные долота с различным числом шарошек представлены в виде графиков на рис. 7 (величина $M_{он}$ для всех инструментов дана в условном измерении). Из представленных графиков следует, что величина опрокидывающего момента за один оборот вращения шарошечных долот на забое изменяется, имея периодически максимальные и минимальные значения, а число максимальных и минимальных значений зависит от конструкции долот, а именно от числа симметрично установленных шарошек. В то же время для долот режуще-скалывающего типа без шарошек величина $M_{он}$ за оборот вращения остается неизменной (линия 1).

Таким образом, можно добиться некоторого повышения устойчивости буровых компоновок, если использовать выявленную характеристику $M_{он}$ при различной ориентации долота относительно слоистости или сланцеватости породы. В данном случае возможна ориентированная установка долота относительно компоновки с профильным поперечным сечением (эллиптическое и др.), обладающей неравной жесткостью на изгиб относительно различных главных осей поперечного сечения. При этом, если оси вращения шарошек двухшарошечного долота совмещаются с осью поперечного сечения компоновки, вдоль которой имеется максимальная жесткость, то удастся нейтрализовать действие $M_{он}$ на компоновку со стороны забоя и повысить устойчивость бурового снаряда. Данное техническое решение представлено в а.с. № 1231199 [21].

Анализ, выполненный на примере шарошечного долота, может иметь более широкое назначение и открывает направление разработки породоразрушающих инструментов для бурения анизотропных пород. Данное направление характеризуется динамизацией связей породоразрушающих элементов с самим буровым инструментом.

Подобный инструмент может разрабатываться на основе теоретических положений, сформулированных выше, что позволит обеспечить некоторую нейтрализацию дестабилизирующих силовых факторов, возникающих при разрушении пород с анизотропией физико-механических свойств. Например, в соответствии с законом изменения величины опрокидывающего момента предложены конструкции долота и коронки, способные нейтрализовать действие дестабилизирующей работу инструмента силовых факторов (пат. РФ № 2246603, 2167261) [22, 23].

Важной особенностью механизма разрушения горной породы шарошечным долотом является его двойственность – процесс раздавливания породы под действием осевого усилия P и дробление-скалывание породы усилием Q при перекачивании шарошки (рис. 8).

Осевая составляющая разрушающих усилий P обеспечит при угле встречи оси бурового инструмента со слоями горной породы γ появление опрокидывающего момента, значение которого можно

определить по формулам (8), (9), (10), (12) в зависимости от вида вооружения шарошек долота – сферические, конусные или трапецеидальные породоразрушающие вставки. Расчет по одной из формул позволяет получить график изменения $M_{он}$ в зависимости от угла встречи долота со слоями горной породы. Такая зависимость представлена на рис. 8 (позиция 1). Как следует из данной зависимости, наблюдается два максимальных значения $M_{он}$: первый при малых значениях угла встречи γ – в этом случае опрокидывающий момент ориентирует инструмент в направлении падения слоев породы; второй при больших значениях угла встречи γ – в этом случае опрокидывающий момент ориентирует инструмент поперек простирающихся слоев породы.

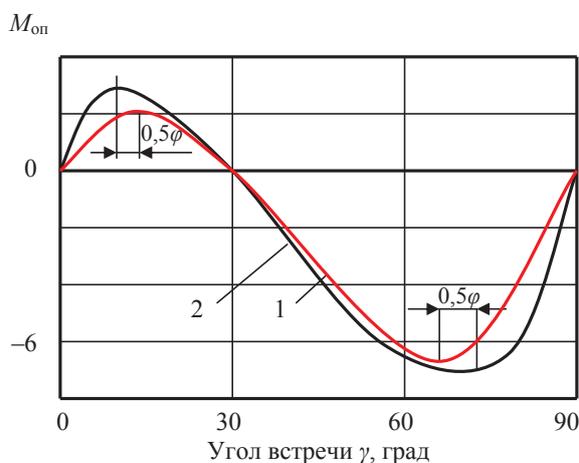


Рис. 8. Зависимость $M_{он}$ от угла встречи со слоями пород γ . График отражает влияние: 1) только осевой силы на долото; 2) усилия дробления-скалывания породы

Fig. 8. $M_{он}$ dependence on incident angle with rock layers γ . The graph reflects the influence of: 1) axial force on a bore bit; 2) rock breaking-shearing force

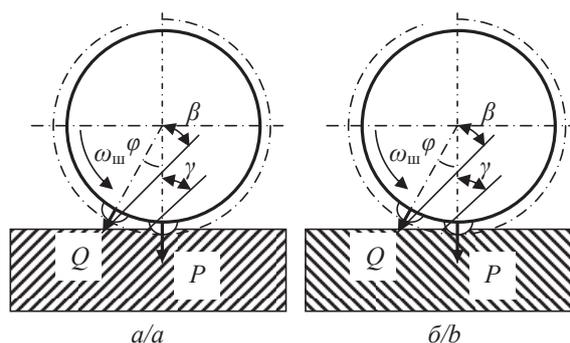


Рис. 9. Схема взаимодействия шарошечного долота с анизотропной горной породой при угле встречи γ . Положение шарошки на забое в момент: а) совпадения направления приложения удара с направлением слоистости; б) когда направление приложения удара ориентировано поперек слоистости

Fig. 9. Pattern of a cone bit interaction with anisotropic rock at incident angle γ . A cone roller position on a face at the moment: а) of coincidence of shock application direction with lamination direction; б) when shock application direction is oriented across lamination

При этом важно отметить, что в процессе вращения шарошки на забое за один оборот вращения долота одна из шарошек долота может воздействовать на породу в момент, при котором направление приложения ударной нагрузки Q совпадает с направлением падения слоев (рис. 9, а) и через пол-оборота наступает ситуация, при которой направление приложения ударной нагрузки ориентировано поперек слоев породы (рис. 9, б). Именно эта особенность и задает основную неравномерность разрушения анизотропной породы при работе шарошечного долота, так как твердость и упругость породы максимальны в направлении слоев и минимальны поперек слоев породы.

При разрушении анизотропной горной породы возможны два экстремальных с точки зрения неравномерности разрушения породы случая:

- направление приложения усилия Q в момент нанесения удара породоразрушающей вставкой совпадает с направлением ориентировки слоев породы;
- направление приложения усилия Q в момент нанесения удара перпендикулярно слоям породы.

В первом случае породоразрушающее действие вдоль приложения усилия Q будет испытывать максимальное сопротивление дроблению-скалыванию, так как анизотропная горная порода обладает максимальной твердостью и упругостью именно в этом направлении. Такой вариант процесса разрушения возможен, если угол встречи бурового инструмента γ будет равен значению $0,5\varphi$ – половине центрального угла между осями породоразрушающих вставок в венце шарошки. Этот угол может составлять при более частом расположении вставок $5-7^\circ$, при более редком их расположении – $10-15^\circ$. В этом случае угол приложения удара породоразрушающей вставкой во второй позиции шарошки на забое (рис. 9, б) будет равен $(90-0,5\varphi)$.

Таким образом, при углах встречи буровым инструментом напластования горной породы, равно $0,5\varphi$, в одной части забоя инструмент будет испытывать максимальное сопротивление разрушению, а в диаметрально противоположной точке забоя – близкое к минимальному. При этом на величину разности сопротивлений разрушению будет влиять схема расстановки породоразрушающих вставок, а именно угол φ .

Во втором случае породоразрушающее действие вдоль приложения усилия Q будет испытывать минимальное сопротивление дроблению-скалыванию, так как анизотропная горная порода обладает минимальными значениями твердости и упругости именно в этом направлении. Такой вариант процесса разрушения возможен, если угол встречи бурового инструмента γ будет равен значению $(90-0,5\varphi)$. В этом случае угол приложения удара породоразрушающей вставкой во второй позиции шарошки на забое (рис. 9, б) будет равен $0,5\varphi$.

Например, если угол $\varphi=20^\circ$, а твердость горной породы вдоль слоев 1500 МПа, перпендикулярно слоям 1000 МПа, т. е. коэффициент анизотропно-

сти горной породы по твердости равен 1,5, в первом случае при угле встречи бурового инструмента с напластованием породы $\gamma=10^\circ$ максимальная твердость при приложении усилия Q составит 1500 МПа, а в противоположной точке забоя при $\gamma=80^\circ$ твердость породы будет равна 1009 МПа.

В результате такого различия в твердости в диаметрально противоположных точках забоя будет существенно отличаться и глубина внедрения породоразрушающих вставок шарошек долота, что приведет к росту опрокидывающего момента, деформации компоновки и повышенному искривлению скважины.

Во втором случае, когда усилие Q ориентировано поперек слоев породы, при выше использованных условиях расчета, минимальное значение твердости составит при угле встречи 90° 1000 МПа, а максимальное – 1479 МПа.

На рис. 8 (позиция 2) приведен график изменения опрокидывающего момента с учетом составляющей разрушения горной породы дроблением-скалыванием под действием усилия Q . Данный график показывает, что области влияния максимальных значений опрокидывающего момента, возникающего при разрушении анизотропных горных пород, расширяются и смещаются в сторону меньших значений угла встречи в первом случае и в сторону больших значений угла встречи во втором случае. Величина смещения максимальных значений опрокидывающего момента, полученных при осевом приложении усилия и при косом ударе, ориентировочно может оцениваться как $0,5\varphi$. Отмеченная особенность механизма разрушения анизотропных горных пород шарошечными долотами сказывается на результатах искривления скважин в анизотропных породах, определяя большее влияние анизотропии горных пород на направление скважин, буримых в анизотропных породах.

Выводы

1. Одним из основных силовых факторов, вызывающих искривление скважин при разрушении анизотропных горных пород, является явление опрокидывающего момента, вызванного неравенством упругих и прочностных свойств горных пород. Величина этого момента определяется значением осевого усилия, размерами и формой породоразрушающих элементов, а также задается параметрами анизотропии физико-механических свойств горной породы и углом встречи бурового инструмента со слоями горной породы.
2. Величина опрокидывающего момента при разрушении анизотропной горной породы шарошечным долотом изменяется за один оборот вращения долота на забое, при этом число максимальных и минимальных значений, а также их амплитуда колебаний зависят от числа шарошек долота и угла наклона осей вращения шарошек по отношению к забоя скважины. От-

- меченная особенность колебаний величины опрокидывающего момента может использоваться при проектировании компоновок буровой колонны с целью минимизации влияния опрокидывающего момента на искривление скважин в анизотропных горных породах.
3. Процесс искривления скважин в анизотропных породах, буримых шарошечными долотами, определяется механизмом разрушения горных пород и его особенностями, к которым следует отнести двойственный характер породоразрушающего действия – раздавливание породы осевой силой и дробление-скалывание породы косым ударом, который наносится под углом к забой, а также с некоторыми конструктивными особенностями вооружения долот.
 4. К особенностям вооружения шарошечных долот, влияющих на процесс разрушения анизотропной горной породы и появления опрокидывающего момента, можно отнести форму и размеры породоразрушающих вставок, угол их приострения, а также схему установки породоразрушающих вставок в венцах шарошек долота.
 5. Выявленные особенности механизма разрушения анизотропной горной породы шарошечными долотами, а также полученные аналитические зависимости расчета величины опрокидывающего момента могут использоваться при проектировании технических средств, например компоновок буровой колонны и технологий бурения скважин в анизотропных горных породах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / П.А. Бродский, Д.М. Губерман и др. / под ред. В.П. Орлова, Н.П. Лавёрова. – М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. – 260 с.
2. Сулакшин С.С. Направленное бурение. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
3. Боярко Ю.Л. Борьба с искривлением скважин. – Томск: Изд-во ТПИ, 1969. – 110 с.
4. Вудс Г., Лубинский А. Искривление скважин при бурении. – М.: Гостехиздат, 1960. – 162 с.
5. Морозов Ю.Т. Бурение направленных и многоствольных скважин малого диаметра. – М.: Недра, 1976. – 211 с.
6. Калинин А.Г. Искривление скважин. – М.: Недра, 1974. – 294 с.
7. Bredley W.V. Formation characteristics have a key effect on hole direction // Oil and gas J. – 1975. – V. 73. – № 31. – P. 77–80.
8. Кривошеев В.В. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 240 с.
9. Колесников А.Е., Мелентьев Н.Я. Искривление скважин. – М.: Недра, 1979. – 176 с.
10. Колесников А.Е. Механизм искривления скважин. – Орджоникидзе, 1983. – 48 с. – Деп. В ЦНИИЭИцветмет 01.11.83, № 1080 цм – Д83.
11. Шолохов Л.Г. Теоретические основы технологии и проектирования направленного бурения скважин. – Свердловск: Изд-во Свердлов. горн. ин-та, 1982. – 110 с.
12. Зиненко В.П. Направленное бурение. – М.: Недра, 1990. – 152 с.
13. Боголюбовский К.А., Зиненко В.П., Кирсанов А.Н. Процесс естественного искривления скважин вращательного бурения в анизотропной среде // Изв. Вузов. Геология и разведка. – 1974. – № 3. – С. 110–116.
14. Герцберг Ю.М., Серета Н.Г. Об исследовании вектора нагрузки на забой в условиях разбуривания анизотропных горных пород // Технология бурения нефтяных и газовых скважин. – Уфа: УНИ, 1984. – С. 63–67.
15. Жеребкин А.И. Экспериментальный метод определения отклоняющей силы, возникающей при взаимодействии долота с наклонно-залегающей анизотропной породой // Изв. Вузов. Нефть и газ. – 1978. – № 1. – С. 13–17.
16. Экспериментальное исследование отклоняющей силы, возникающей при разбуривании наклонно-залегающих пород долотами различных типов / А.И. Жеребкин, Ю.М. Герцберг и др. // Технология бурения нефтяных и газовых скважин». – Уфа: УНИ, 1971. – Вып. 10. – С. 89–92.
17. Нескоромных В.В. Механика разрушения анизотропных горных пород при бурении скважин заданного направления. – М.: МГП «Геоинформмарк», 1997. – 57 с.
18. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернометрии. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 328 с.
19. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1984. – 359 с.
20. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. – 328 с.
21. Устройство для бурения скважин. А.с. СССР № 1231199, Е21В7/10, Бюл. № 18, 1986 г.
22. Буровой инструмент: пат. РФ № 2246603, Е21В 10/22, Е21В 10/48, заявл. 08.12.2003; опубл. 20.02.2005. – Бюл. № 6.
23. Буровая алмазная коронка: пат. РФ № 2167261, Е21В 10/48, заявл. 16.03.2000; опубл. 20.05.2001. – Бюл. № 5.

Поступила 30.05.2014 г.

UDC 622.243

ANALYSIS OF ANISOTROPIC ROCK DESTRUCTION WITH CONE BITS

Vyacheslav V. Neskromnykh,

Dr. Sc., Siberian Federal University, 79/10, Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: sovair@bk.ru

Relevance of work is caused by the need to solve the problem of controlling well direction when drilling.

The main aim of the study is to obtain the analytical dependences for calculation of an overturning moment arising at rock destruction by anisotropic mountain. The moment destabilizes the work of a roller cone bits; and to determine the analytical relation of bit design features with the size of this power factor.

The methods used in the study: the analysis of results of experimental works on mechanics of anisotropic rocks destruction by boring bits and indentors of various forms, analytical researches of rock destruction, comparison and analysis of convergence of the obtained data and formulas.

The results. It was ascertained that one of the major power factors causing a curvature of wells at destruction of anisotropic rocks is the occurrence of the overturning moment caused by an inequality of elastic and strength properties of rocks. The size of the moment is determined by the size of axial effort, the size and the form of rock cutting elements, as well as by the parameters of anisotropy of physic-mechanical properties of rock and by the boring tool and rock layers angle of incidence.

The value of the overturning moment at anisotropic rock destruction by a roller cone bit changes for one turn of a chisel rotation on a face. The number of the maximum and minimum values as well as their fluctuation amplitude depends on a number of roller cone bits and a tilt angle of cone roller rotation axes in relation to a well face. The mentioned feature of the overturning moment size fluctuation can be used when designing configurations of a boring column to minimize the influence of the overturning moment on a curvature of wells, drilling in anisotropic rocks.

Well curving in anisotropic breeds drilled with roller cone bits, is defined by the mechanism of rock destruction and its features. The dual nature of rock cutting action – rock crush by axial force and rock crushing by slanting by a blow at an angle to a face is included into the process and also some design features of arms of bits.

A form and sizes of rock cutting inserts, an angle of their sharpening as well as the scheme of rock cutting inserts installation in wreaths of roller cone bits can be referred to the features of arms of the roller cone bits influencing the destruction of anisotropic rock and occurrence of the overturning moment.

Key words:

Rock, drilling, roller cone bits, field of mechanical tension, curvature of wells.

REFERENCES

1. Brodskiy P.A., Guberman D.M. *Kolskaya sverkhglubokaya. Nauchnye rezultaty i opyt issledovaniy* [The Kola superdeep. Scientific results and experience of researches]. Eds. V.P. Orlov, N.P. Laverov. Moscow, Tekhneftegas Publ., 1998. 260 p.
2. Sulakshin S.S. *Napravlennoe burenie* [Directed drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 272 p.
3. Boyarko Yu.L. *Borba s iskrivleniem skvazhin* [Fight against a curvature of wells]. Tomsk, TPI Publ., 1969. 110 p.
4. Vuds G., Lubinskiy A. *Iskrivlenie skvazhin pri burenii* [Curvature of wells when drilling]. Moscow, Gostoptekhisdat Publ., 1960. 162 p.
5. Morozov Yu.T. *Burenie napravlennykh skvazhin i mnogostvolnykh skvazhin malogo diametra* [Drilling of the directed wells and multilateral wells of small diameter]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 211 p.
6. Kalinin A.G. *Iskrivlenie skvazhin* [Curvature of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 294 p.
7. Bredley W.B. Formation characteristics have a key effect on hole direction. *Oil and gas J.*, 1975, vol. 73, no. 31, pp. 77–80.
8. Krivosheev V.V. *Iskrivlenie skvazhin v anizotropnykh porodakh* [Curvature of wells in anisotropic rocks]. Tomsk, NTL Publ., 1999. 240 p.
9. Kolesnikov A.E., Melentev N.Ya. *Iskrivlenie skvazhin* [Curvature of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 176 p.
10. Kolesnikov A.E. *Mekhanizm iskrivleniya skvazhin* [Mechanism of a curvature of wells]. Ordzhonikidze, 1983. 48 p. Dep. v TSNI-IEIzhvetmet 01.11.83, № 1080 zhm – D83.
11. Sholokhov L.G. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii i proektirovaniy napravlennoy bureniya skvazhin* [Theoretical bases of technology and design of the directed well drilling]. Sverdlovsk, SGI Publ., 1982. 110 p.
12. Zinenko V.P. *Napravlennoe burenie* [Directed drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 152 p.
13. Bogolyubsky K.A., Zinenko V.P., Kirsanov A.N. *Protsess estestvennoy iskrivleniya skvazhin vrashchatelnogo burenia v anizotropnoy srede* [Natural rotary drilling well curvature in anisotropic environment]. *Izvestiy vuzov. Geologiya i razvedka*, 1974, no. 3, pp. 110–116.
14. Gerzhberg Yu.M., Sereda N.G. Ob issledovanii vektora nagruzki na zaboy v usloviyakh razburivaniya anizotropnykh gornykh porod [On the research of a face force vector when drilling out anisotropic rocks]. *Tekhnologiya bureniya neftyanykh i gasovykh skvazhin* [The technique of drilling oil and gas wells]. Ufa, UNI Publ., 1984, pp. 63–67.
15. Zhrebkin A.I. Eksperimentalny metod opredeleniya otklonyayushchey sily, vznikayushchey pri vzaimodeystvii dolota s naklonno-zalegayushchey anizotropnoy porodoy [Experimental method of determining the rejecting force arising at chisel interaction with inclined lying anisotropic rocks]. *Izvestiy vuzov. Neft i gas*, 1978, no. 1, pp. 13–17.
16. Zhrebkin A.I., Gerzhberg Yu.M., Sereda N.G. Eksperimentalnoe issledovanie otklonyayushchey sily, vznikayushchey pri rasburivaniy naklonno-zalegayushchikh porodoy dolotami raslichnykh tipov [Pilot study of the rejecting force arising when drilling out the inclined lying rocks by chisels of various types]. *Tekhnologiya bureniya neftyanykh i gasovykh skvazhin* [The technique of drilling oil and gas wells]. Ufa, UNI Publ., 1971. Iss. 10, pp. 89–92.
17. Neskoromnykh V.V. *Mekhanika razrusheniya anizotropnykh porod pri burenii skvazhin zadannogo napravlniya* [Mechanics of destruction of anisotropic rocks when drilling wells of the set direction]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1997. 57 p.
18. Neskoromnykh V.V. *Napravlennoe burenie i osnovy kernometrii* [The directed drilling and bases of core orient]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 328 p.
19. Rzhvesky V.V., Novik G.Ya. *Osnovy fiziki gornykh porod* [Fundamentals of physics of rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 359 p.
20. Neskoromnykh V.V. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin* [Destruction of rocks when drilling wells]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2014. 328 p.
21. Neskoromnykh V.V. *Ustroystvo dlya bureniya skvazhin* [The device for well drilling]. A.s. USSR no. 1231199, E21B7/10, B. I. № 18, 1986.
22. Neskoromnykh V.V., Purevsuren Ravdan. *Burovoy instrument* [Drill tool]. Patent RF, no. 2246603, E21B 10/22, E21B 10/48, 2005.
23. Neskoromnykh V.V., Bolshakov V.V., Kostin Yu.S., Permyakov E.L. *Burovaya almaznaya koronka* [Drill diamond bit]. Patent RF, no. 2167261, E21B 10/48, B. II. № 14, 2005.

Received: 30 May 2014.

УДК 556.56:551.583:56.074.6(571.1)

ДЕТАЛЬНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ БОЛОТА КАК ОТКЛИК НА ИЗМЕНЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА ГОЛОЦЕНА (СРЕДНЯЯ ТАЙГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Прейс Юлия Ивановна,

канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории геоинформационных технологий ФГБУН Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3.

E-mail: preisyui@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки краткосрочных прогнозов функционального состояния основных ландшафтов и климата Западной Сибири, учитывающих региональные особенности отклика болот на изменения континентального климата голоцена.

Цель работы: детальная реконструкция динамики растительных сообществ, водных режимов и торфонакопления среднетаежного олиготрофного болота с учетом влияния палеокриогенных процессов.

Методы исследования: детальные (с шагом 1–5 см) исследования ботанического состава и физико-химических свойств торфа; радиоуглеродное датирование (13 дат) торфяных отложений; реконструкция фитоценозов и водных режимов традиционными палеоэкологическими методами; реконструкция палеокриогенных процессов на основе системно-эволюционного методического подхода к поиску нарушений аутогенного развития и комплекса биоиндикаторов из криолитозоны; авторская методика корректировки хронологии торфонакопления с учетом его перерывов; сравнительный анализ полученных данных и данных региональных реконструкций климата.

Результаты. Выполнена реконструкция динамики растительных сообществ, водного режима и аккумуляции торфа и углерода. Выявлены многочисленные нарушения аутогенного развития болота частыми сменами гидротермического режима климата и палеокриогенными процессами. Выявлено, что инициация и пульсирующий характер заболачивания хорошо дренированной песчаной террасы обусловлены влиянием деградации многолетнемерзлого водоупора около 7145 кал. лет назад и его формированием около 6520 кал. лет назад. Прекращения аккумуляции торфа около 4600–3950, 2150–1770 и 1550–1340 кал. лет назад обусловлены формированием крупных многолетнемерзлых бугров пучения в сухие похолодания и термокарстовых озер в последующие потепления. Наряду с озерами и их сплавинами, наиболее влажными были стадии развития около 5350, 3760, 3264, 3025, 2852, 1120–920, 870–600 кал. лет назад. Долговременная скорость аккумуляции углерода равна 20,4 г/м² в год, максимальные скорости (40,6–45,0 г/м² в год) были в периоды похолодания, в основном влажного 3170–2815 кал. лет назад, влажных потеплений и похолоданий 1000–560 кал. лет назад. Показано, что учет палеокриогенных процессов, использование дат-аналогов и слоев торфа-аналогов позволяет значительно повысить качество реконструкции функционального состояния болота и получить объективные данные по динамике аккумуляции торфа и С.

Ключевые слова:

Торфяная залежь, реконструкция, фитоценоз, водный режим, аккумуляция торфа, многолетняя мерзлота, климат, голоцен, средняя тайга, Западная Сибирь.

Введение

В свете современного глобального изменения климата актуальны краткосрочные прогнозы функционального состояния болотных экосистем, являющихся одним из основных ландшафтов Западной Сибири. Такие прогнозы должны базироваться на детальных реконструкциях, учитывающих особенности регионального отклика болот на изменения климата. Однако отклик болот Западной Сибири на конкретные климатические события голоцена еще недостаточно изучен. При этом отсутствует единое мнение и о характере гидротермического режима некоторых из этих событий. Это обусловлено, по нашему мнению, прежде всего, недоучетом особенностей влияния регионального континентального климата на базовый объект реконструкций – торфяные отложения. Находки реликтовых торфяных многолетнемерзлых (ММ) бугров пучения [1–6] в зоне сезонного промерзания пород Западной Сибири и данные их палеореконовструкций [7–12] свидетельствуют о неоднократных прекращениях торфонакопления в пе-

риоды похолоданий голоцена и происходящих при этом потерях палеоинформации [10, 13]. Недоучет этого приводит также к неправильному определению трендов водных палеорежимов болотных экотопов. Однако, в связи со сложностью выявления палеокриогенных процессов в торфяных отложениях, они практически не учитываются при исследовании болот вне криолитозоны, несмотря на то, что на прерывистый характер торфонакопления указывал еще в 1971 г. М.И. Нейштадт [14], а по мнению А.Д. Гиличинского [15] вся территория зоны сезонного промерзания пород Западной Сибири, ограниченная с юга линией Свердловск–Ишим–Новосибирск является сезонной криолитозонной.

Ранее нами рассмотрено влияние палеокриогенных процессов на динамику грядово-мочажинного комплекса среднетаежного раннеголоценового олиготрофного болота [8]. Однако датирование объемных образцов (толщиной 25 см) не позволило получить точные хронологии стадий смен растительных сообществ и водных режимов.

Цель работы – детальная реконструкция динамики растительных сообществ, водных режимов и торфонакопления олиготрофного среднетаежного болота с учетом влияния палеокриогенных процессов.

Объекты и методы исследования

Болото Средне-Васюганское расположено в подзоне средней тайги Западной Сибири, залегает на I левобережной надпойменной песчаной террасе р. Васюган, в 2 км на север от п. Средний Васюган.

Климат района исследования континентально-циклонический [16]. Согласно данным метеостанции Средний Васюган, среднегодовая температура равна $-0,9$ °С, средняя температура января $-19,9$ °С, июля $+18,3$ °С (за период наблюдения 1940–2012 гг.). Количество осадков – $539,7$ мм/год (1966–2012 гг.) [17].

Торфяной разрез заложен в типичном сосново-кустарничково-сфагновом (*Sphagnum fuscum*) фитоценозе – низком рьяе ($59^{\circ}26'70''$ с.ш., $78^{\circ}33'33''$ в.д.). Отобранные с шагом 1–5 см образцы торфа проанализированы на ботанический состав микроскопическим методом [18], степень разложения (С) – методом центрифугирования [18], зольность (А), кислотность (рН), плотность (Р), весовую влажность (W) по методикам Инсторфа [19], используя для анализа кислотности рН-метр HI 8314 (аналитики Магур М.Г., Шарапова Т.А., ИМКЭС СО РАН). Хронология торфонакопления основана на 13 радиоуглеродных датах (аналитики Мелков В.Н., Симонова Г.В., ИМКЭС СО РАН), калиброванных при помощи программного обеспечения CALIB 5.0.1 Manual [20, 21] в системе BP (Before Present).

Методы реконструкции функционального состояния болот

В основу реконструкции палеофитоценозов положено допущение, что видовой состав растительных остатков торфа отражает их доминантное ядро. Реконструкция палеогидрологии выполнена методом расчета индекса влажности (IW), косвенного показателя уровня болотных вод (УБВ), по растительным остаткам, слагающим торфяную залежь [22]. В качестве дополнительных индикаторов водного режима использовались показатели свойств торфа. Известно, что *R* определяется, прежде всего, продолжительностью нахождения растительных остатков в верхнем аэрируемом слое торфяной залежи, толщина которого зависит от УБВ. *P* торфа коррелятивно связана с *R*. В условиях повышения проточности водного режима возрастают *A* и *R* торфа.

Поиск климатически обусловленных стадий развития проведен на основе системно-эволюционного методического подхода к поиску нарушений аутогенного развития болот, совпадающих с известными климатическими событиями. Такими нарушениями, прежде всего, являются: резкие, с разрывом сукцессионных связей, изменения видового состава палеофитоценозов; отсутствие согла-

сованного изменения показателей свойств торфа (*R*, *P*, *A*) и *IW* по глубине залежи, обусловленное их вторичным диагенезом; неравномерно низкие показатели прироста ($V_{пр}$) и скорости аккумуляции ($V_{ак}$) органического вещества (ОВ) торфа и *C*, свидетельствующие о значительном замедлении или прекращении торфонакопления. Эти нарушения обусловлены резкими изменениями водных режимов болотных экотопов, которые в условиях Западной Сибири, даже в зоне сезонного промерзания пород, были вызваны как прямым, через влажностной режим, воздействием континентального климата, так и косвенным, через физическое состояние (талое-мерзлое) почво-грунтов и торфяных отложений [7–12].

Реконструкция криогенных процессов проведена по диагностическим признакам влияния их на динамику и стратиграфию болот криолитозоны гюларктики, свойства и скорость накопления торфов обычно используемых при палеоэкологических исследованиях, проводимых на юге этой зоны, информация о которых обобщена в [23]. Для подтверждения допущения, что на болотах зоны сезонного промерзания аналогичные нарушения в периоды похолоданий голоцена также имели криогенный генезис, проведена их синхронизация с датированными палеокриогенными процессами зоны многолетнемерзлых пород.

Палеокриогенным нарушением, прежде всего, является несоответствие типа заболачивания степени обогащенности биофильными элементами подстилающих почво-грунтов [7, 12]. Трансгрессия олиготрофных сфагновых мхов в периоды похолоданий голоцена непосредственно на тяжелые карбонатные глины и суглинки однозначно свидетельствует о наличии в них многолетнемерзлого или длительно сезоннооттаивающего водоупора. По нашему мнению, надежное диагностирование наличия палеокриогенного водоупора в песчаных грунтах возможно лишь по комплексу индикаторов, которые отражают влияние его деградации на видовой состав и структуру болотных фаций ранних стадий развития. Это влияние проявляется, *во-первых*, в сочетании олиго- или мезотрофного типа заболачивания с последующим возвратом на литогеннообусловленный более минеротрофный путь развития, как результат исчезновения изолирующего влияния водоупора. *Во-вторых*, в смене простых болотных фаций заболачивания гетеротрофными комплексами в начале последующего потепления, из-за различий в усадке оттаивающих мерзлых грунтов. *В-третьих*, в разболачивании в связи с возрастанием дренирования территории при полной деградации мерзлоты. Для реконструкции ММ водоупоров мы использовали комплекс индикаторов: 1) наличие остатков олиготрофных сфагновых мхов в придонном слое залежи; 2) появление или возрастание участия эвтрофных видов болотных растений в вышележающем слое; 3) совместное присутствие в одном слое торфа остатков растений, резко отличающихся

ся экологическими требованиями к трофности и обводненности экотопа; 4) прекращение торфонакопления.

Для реконструкции процесса промерзания и пучения крупных торфяных бугров (пальза) использован комплекс индикаторов: 1) наличие палеостратиграфического рубежа (ПСР); 2) прекращение аккумуляции торфа; 3) приуроченность начала прекращения к периоду сухого похолодания. ПСР – граница двух слоев торфа, резко различающихся по ботаническому составу и свойствам, отражает переход поверхности болота при пучении в субазральные, а затем гипераквальные условия термокарстового озера или топи. Ботанический состав нижнего слоя зависит от степени обсыхания поверхности на предшествующей пучению стадии, а также от скорости пучения и высоты сформировавшегося бугра. Для лесной зоны характерна обогащенность нижнего слоя остатками древесины и пушицы, повышение R и P . Верхний слой, менее разложившийся и плотный, образован, в зависимости от наличия–отсутствия термокарстового озера, топяными сфагновыми мхами и шейхцерией или менее гидрофильными *Sphagnum magellanicum* и *S. fuscum*. Приуроченность начала прекращения к периоду сухого похолодания исключает его озерный генезис на данной стадии развития. Прекращение торфонакопления выявляли датированием пар соседних образцов торфа, а при отсутствии такого датирования – по неправомерно низким показателям торфонакопления. Известно, что топяные торфа невысокой степени разложения во всей лесоболотной зоне Западной Сибири имеют $V_{пр}$ около 0,8–1,0 мм/год [24]. Это характерно даже для талых болот криолитозоны, высокая обводненность которых препятствует формированию многолетней мерзлоты [25]. При этом, как более значимые, мы использовали показатели $V_{ак}$ торфа, его OB и C , на которые не влияет степень уплотненности торфов.

Более сложной задачей является реконструкция бугров пучения, формирующихся на олиготрофной стадии развития болот. В криолитозоне формированию многолетней мерзлоты способствует смена гидрофильной растительности мезогидрофильными сфагновыми мхами [26–28]. Прирост и продукция сфагновых мхов ММ болот значительно меньше, чем талых даже в пределах одной подзоны [29, 30]. Меньше также нетто-экосистемная продукция, что частично обусловлено и более быстрым разложением торфа [31]. Согласно [32], одним из диагностических признаков наличия в прошлом ММ является снижение $V_{пр}$ торфа (до 65 %) и $V_{ак} C$ (на 50 %). Так, в субарктической Канаде и на Аляске $V_{ак} C$ после промерзания болот снижается до 5–9,5 г/м² в год [33–35]. Учитывая все это, для реконструкции мелких сфагновых бугров пучения мы использовали следующие индикаторы: 1) появление в торфе остатков менее гидрофильных олиготрофных видов сфагновых мхов (обычно *Sphagnum angustifolium* и *S. magellanicum*, а за-

тем – *S. fuscum*); 2) формирование таких торфов в периоды сухих похолоданий; 3) понижение $V_{пр}$ и $V_{ак}$ торфа; 4) повышение R и P торфа.

Стадии вторичных озер выявлены по косвенным индикаторным признакам: 1) различия трендов изменения P и R при неправомерно низкой P в слое торфа предшествующей стадии, свидетельствующие о вторичном его диагенезе при нахождении в затопленном состоянии; 2) топяной подтип торфа последующей стадии.

Послойные интерполяционные даты, $V_{пр}$ и $V_{ак}$ торфа и его OB рассчитаны с учетом плотности OB абсолютно сухого торфа. Для расчета $V_{ак} C$ принято, что его содержание в разных видах верховых торфов варьирует от 46 до 52 % от OB торфа [36]. Расчеты проведены по двум вариантам: 1) при допущении непрерывного торфонакопления между датировками; 2) с учетом прекращений аккумуляции торфа. По второму варианту для определения возраста слоев торфа и продолжительности периодов прекращения использовались показатели $V_{ак} OB$ соседних слоев-аналогов, сходного ботанического состава и R , но отлагавшихся в благоприятных условиях. При расчете продолжительности стадии прекращения торфонакопления учитывалось, что возраст конца предшествующей стадии равен сумме возраста слоя торфа и временному периоду его отложения. Для случаев двойного генезиса стадии прекращения торфонакопления, в связи с невозможностью датирования начала формирования термокарстового озера, было принято допущение равенства продолжительности стадий: многолетнемерзлой и озерной.

Предшествующими исследованиями нами выявлены и неоднократно датированы основные ПСР в торфяных отложениях лесной зоны Западной Сибири [37], что позволяет оценить степень достоверности вновь полученных радиоуглеродных дат и, при необходимости, использовать даты-аналоги. В связи с тем, что одна радиоуглеродная дата оказалась удрежденной, она была заменена датой аналогичного ПСР другого торфяного разреза.

После пересчета интерполяционных послойных возрастов внесены соответствующие изменения на кривых палеогидрологических режимов. Для стадии ММ крупных бугров пучения принята ступень IW равная 1, для озер – 10. Полученные палеогидрологические кривые торфяного разреза сопоставлялись с палеоклиматическими кривыми лесной зоны Западной Сибири [38], которые были перестроены по калиброванным радиоуглеродным датам их экстремумов, а также с данными других реконструкций климата.

Результаты исследования и обсуждение

Согласно полученным данным, торфяная залежь исследованного разреза имеет глубину 2,62 м, является комплексной верховой, практически на всю глубину сложена верховыми торфами (рис. 1). Преобладают различные виды сфагновых торфов: мочажинный, комплексный, ангустифолиум, фу-

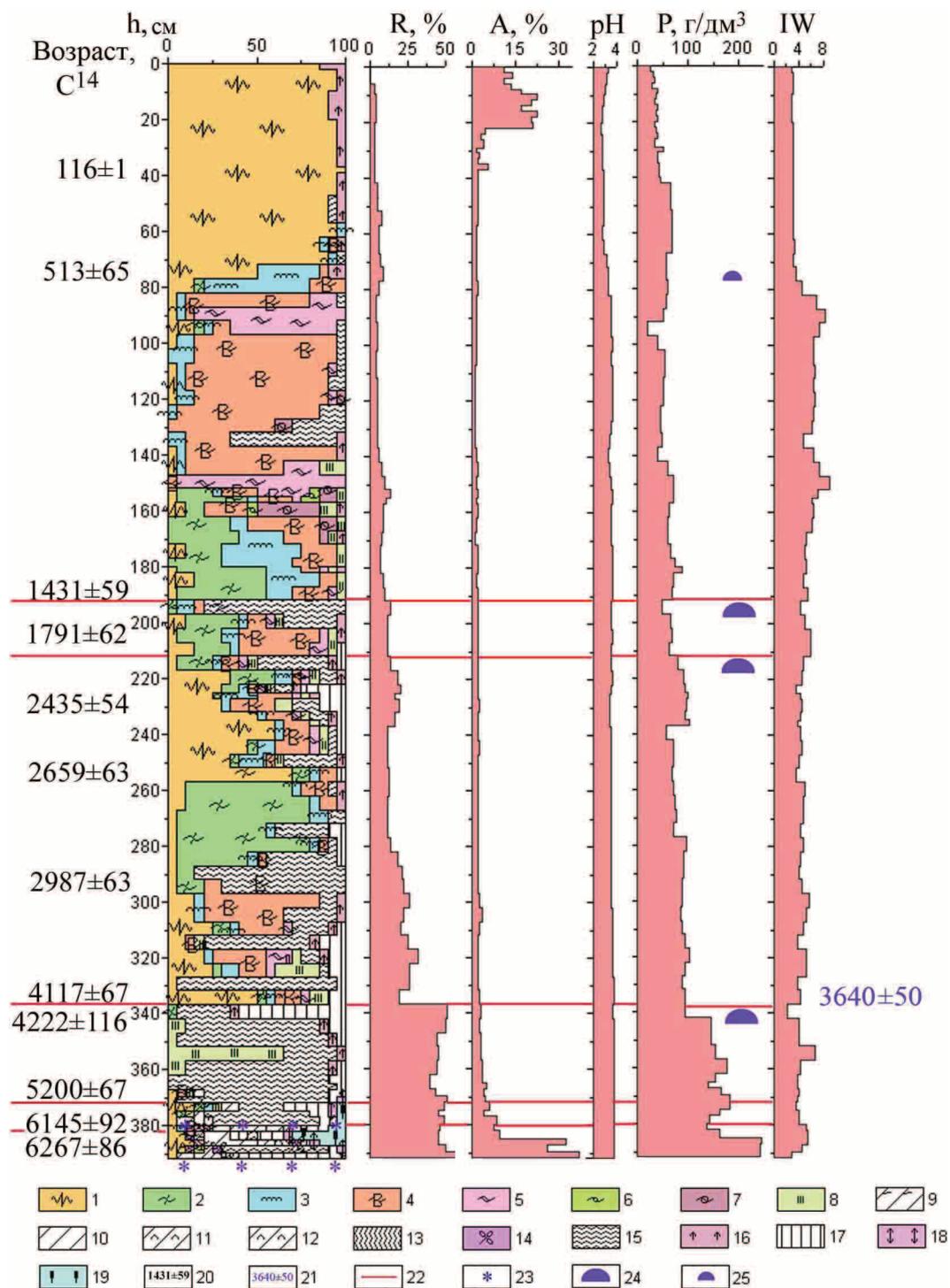


Рис. 1. Стратиграфическая колонка и свойства торфа разреза болота Средне-Васюганское. Растительные остатки: 1) *Sphagnum fuscum*; 2) *S. Angustifolium*; 3) *S. Magellanicum*; 4) *S. Balticum*; 5) *S. majus*; 6) *S. jensenii*; 7) *S. fallax*; 8) шейхцерия; 9) *Carex rostrate*; 10) *C. lasiocarpa*; 11) *C. cespitosa*; 12) *C. appropinquata*; 13) тростник; 14) вахта; 15) пушица; 16) вересковые кустарнички; 17) древесные остатки; 18) ерник 19) рогоз. Радиоуглеродные даты: 20) полученные, 21) аналог. Палеокриогенные процессы: 22) прекращение торфонакопления; 23) многолетнемерзлый водоупор; 24) крупный бугор пучения; 25) мелкий бугор пучения

Fig. 1. Stratigraphic column and features of peat in section of Sredne-Vasyuganskoe bog. Plant remains: 1) *Sphagnum fuscum*; 2) *S. Angustifolium*; 3) *S. Magellanicum*; 4) *S. Balticum*; 5) *S. majus*; 6) *S. jensenii*; 7) *S. fallax*; 8) sheuchzerite; 9) *Carex rostrate*; 10) *C. lasiocarpa*; 11) *C. cespitosa*; 12) *C. appropinquata*; 13) reed peat; 14) bogbean; 15) cotton grass; 16) erica subshrub; 17) wood remains; 18) dwarf birch; 19) catoptric. Paleocryogenic processes: 22) peat accumulation stopping; 23) permafrost aquaclude; 24) large-sized frost mound; 25) small frost mound

скуп. Нижний слой залежи образован преимущественно пушицевыми торфами. В целом от дна к поверхности разреза выражена общая тенденция закономерного уменьшения A , R , P в соответствии с нарастанием торфа и возрастанием IW . Долговременные, за 7145 лет, $V_{пр}$ торфа, $V_{ак}$ асв торфа, его OB и C равны, соответственно, 0,55 мм/год, 43,7, 41,5 и 20,4 г/м² в год.

Нарушения эндогенного развития

Выявлены следующие нарушения: многократное чередование слоев разных грядовых и топяных сфагновых торфов, наличие многочисленных тонких прослоек, обогащенных остатками пушицы или древесины, пульсирующий и несогласованный характер изменения R , P и IW по глубине залежи.

Кроме этого, в отличие от классических моделей роста болот, разработанных для регионов с океаническим климатом, имеющих экспоненциальный характер изменения и вогнутую форму

[39], полученные нами кривые зависимости глубина–возраст (рис. 2, а, вариант 1), и кумулятивная масса – возраст (рис. 2, б, вариант 1) состоят из нескольких линий регрессии и содержат выпуклые фрагменты.

Такие же нарушения выявлены ранее на континентальных болотах Канады [40–43]. Высказано предположение [43], что изменения формы кривой вызваны колебаниями в первичной продуктивности, уменьшение которой приводит к выпуклой форме кривой. По мнению авторов, выпуклый отрезок кривой связан с ограниченной влажностью континентального климата, изменением местной гидрологии, доступностью питательных веществ. Изменение угла наклона линий регрессии полученных нами моделей соответствует варьированию $V_{пр}$ торфа и $V_{ак}$ его OB , а выпуклые отрезки – уменьшению этих показателей. Кривые зависимости $V_{пр}$ торфа (рис. 3, а), $V_{ак}$ OB торфа и C (рис. 4, а) от возраста имеют пульсирующий характер.

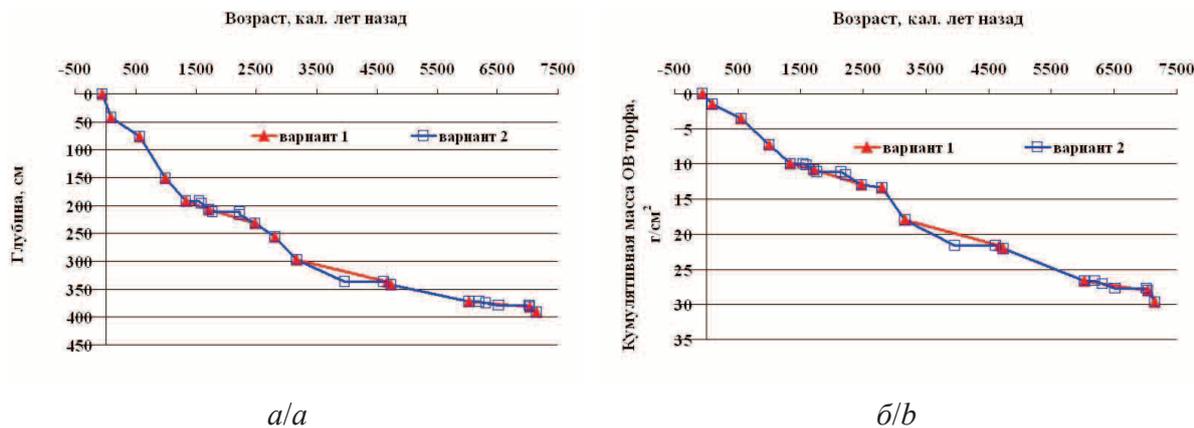


Рис. 2. Зависимости глубины (а) и кумулятивной массы органического вещества торфа (б) от возраста в торфяном разрезе болота Средне-Васюганское по двум вариантам расчета: 1) с равномерным торфонакоплением; 2) с перерывами торфонакопления

Fig. 2. Dependence of depth (a) and cumulative mass of peat organic substance (b) on the age in peat section of Sredne-Vasyuganskoe bog by two variants of calculation: 1) with equal peat accumulation; 2) with breaks in peat accumulation

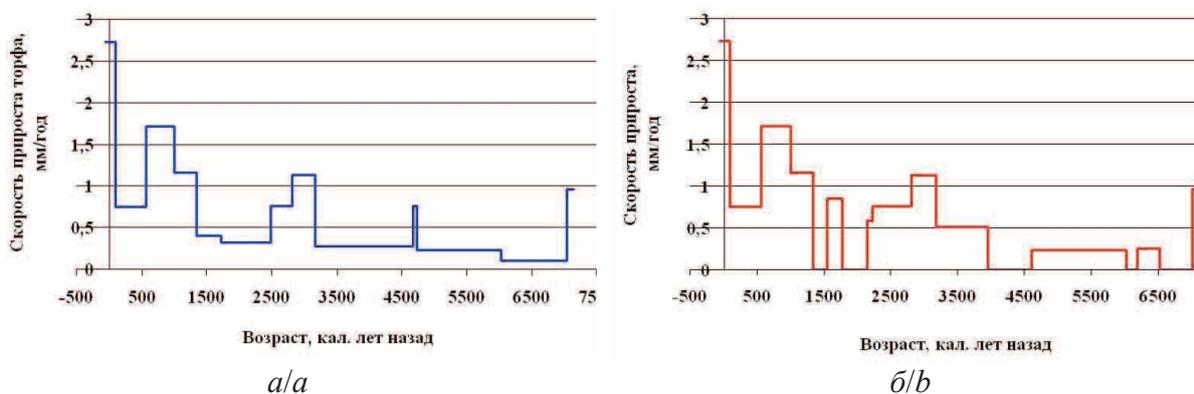


Рис. 3. Динамика скорости прироста торфа в торфяном разрезе болота Средне-Васюганское по двум вариантам расчета: а) с равномерным торфонакоплением; б) с перерывами торфонакопления

Fig. 3. Dynamics of peat accumulation rate in peat section of Sredne-Vasyuganskoe bog by two variants of calculation: a) with equal peat accumulation; b) with breaks in peat accumulation

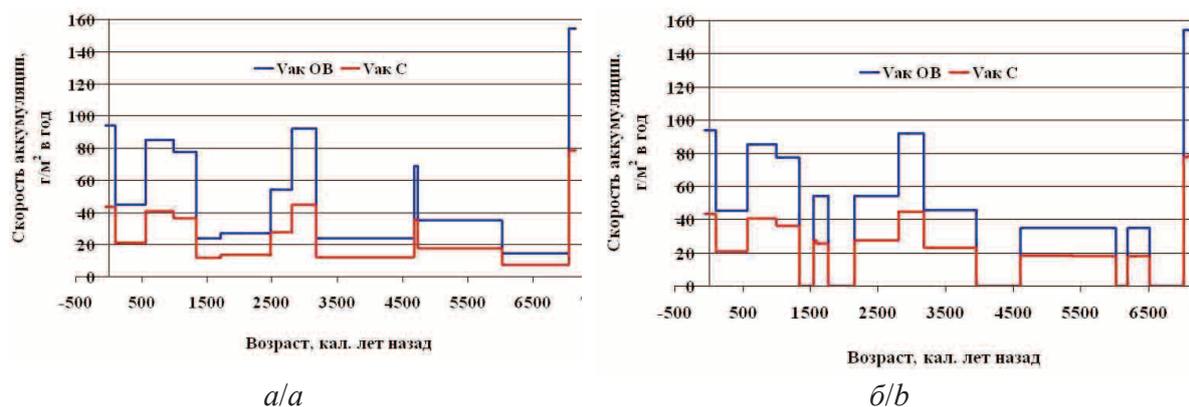


Рис. 4. Динамика скорости аккумуляции органического вещества торфа и C в торфяном разрезе болота Средне-Васюганское по двум вариантам расчета: а) с равномерным торфонакоплением; б) с перерывами торфонакопления

Fig. 4. Dynamics of rate of peat organic substance and C accumulation in peat section of Sredne-Vasyuganskoe bog by two variants of calculation: a) with equal peat accumulation; b) with breaks in peat accumulation

На фоне достаточно высоких показателей $V_{пр}$, $V_{ак}$ OB торфа и C: 0,7–1,7 (2,7) мм/год, 45,1–92,2 (154,1) и 20,8–45 (78,5) г/м² в год, более низкие показатели (0,2 мм/год, 35,1 и 17,7 г/м² в год) закономерны лишь для нижнего слоя залежи, отлагавшегося в условиях резко-переменного режима увлажнения, типичного для ранних стадий развития при суходольном заболачивании. При этом неравномерно низкие показатели торфонакопления (0,1 мм/год, 14,5 и 7,3 г/м² в год) в период 6145±92–5200±67 л. н., когда за 1000-летний период отложилось лишь 10 см торфа, однозначно свидетельствуют о наличии перерыва торфонакопления. В остальные три периода: 4117±67–2987±63 л.н., 2435±54–1791±62–1431±59 л. н. резкого снижения скорости торфонакопления (0,27–0,40 мм/год, 23,9–27,2 и 11,8–13,6 г/м² в год) отлагались преимущественно сфагновые топяные виды торфа. Следовательно, в данные периоды также имели место прекращения торфонакопления.

Одному из этих прекращений соответствует ПСР между глубинами 337 и 342 см. Ботанический состав, R и IW нижнего слоя свидетельствуют о значительном обсыхании поверхности болота, а его P – о последующем нахождении на дне вторичного озера. Верхний слой, судя по свойствам торфа и IW, отлагался в условиях высокого обводнения. Аналогичные ПС рубежи, нижний слой которых формировался в максимум похолодания 4300–4100 л. н., а верхний слой – в начале потепления SB2, около 3755–3650 л. н., неоднократно выявлялись нами на других болотах юга лесной зоны Западной Сибири: Бакчарское, Иксинское, Еловочное [37]. Высокая вероятность формирования в этот период бугра пучения подтверждает и близкий возраст (около 4300 л. н.) реликтового среднетаежного палза в долине р. Кети [44], а также реконструированных для этого периода и существующих в криолитозоне: около 4150 л. н. в Финской Лапландии [45], 4100 л. н. на северо-востоке Европейской части России, в долине р. Уса [46],

4260 л. н. в арктической Канаде [47]. Следовательно, перерыв торфонакопления имел криогенный характер и был обусловлен формированием крупного ММ бугра пучения, а затем термокарстового озера. На основании этого, мы считаем, что дата 4117±67 л. н. является удрененной и вместо нее была принята дата-аналог 3640±50 л. н. или 3960 кал. л. н. (ИМКЭС–11) разреза Иксинского болота [12].

Аналогичные по свойствам ПС рубежи были выявлены и между глубинами 217–212 и 197–192 см. Для перерасчета интерполяционных возрастов и показателей торфонакопления в соответствующие им периоды была использована $V_{ак}$ OB нижезалегающего слоя. При этом для первого из этих периодов получен возраст прекращения торфонакопления с 2150 до 1770 кал. л. н. (2140–1850 л. н.). Начало этого прекращения совпадает с похолоданием [38], в максимум которого, около 2100 л. н., происходило криогенное прекращение накопления торфа даже на южнотаежных болотах, а возраст возобновления торфонакопления близок к возрасту зарастания термокарстовых озер на этих же и среднетаежных болотах [12]. Необходимо отметить, что прекращения аккумуляции торфа на южнотаежных болотах подтверждены датированием пар соседних образцов. Это был период активного формирования палза в криолитозоне многих регионов: около 2030 л. н. в Финляндии [45], 2100–2300 л. н. в Большеземельской тундре [48], 2200–2300 л. н. на северо-востоке Европейской части России, в долинах рек Уса и Роговая [49, 50] и на западе Уральских гор [51], 2000–2400 л. н. в субарктической Канаде [47, 52, 53].

Начало второго, менее продолжительного прекращения – 1550–1340 кал. л. н. (1660–1435 л. н.) – также совпадает с периодом сухого похолодания около 1700 л. н. [38]. Поэтому вполне вероятно, что оно было вызвано аналогичными криогенными процессами. Около 1600–1700 л. н. происходило пучение палза в субарктической и арктической

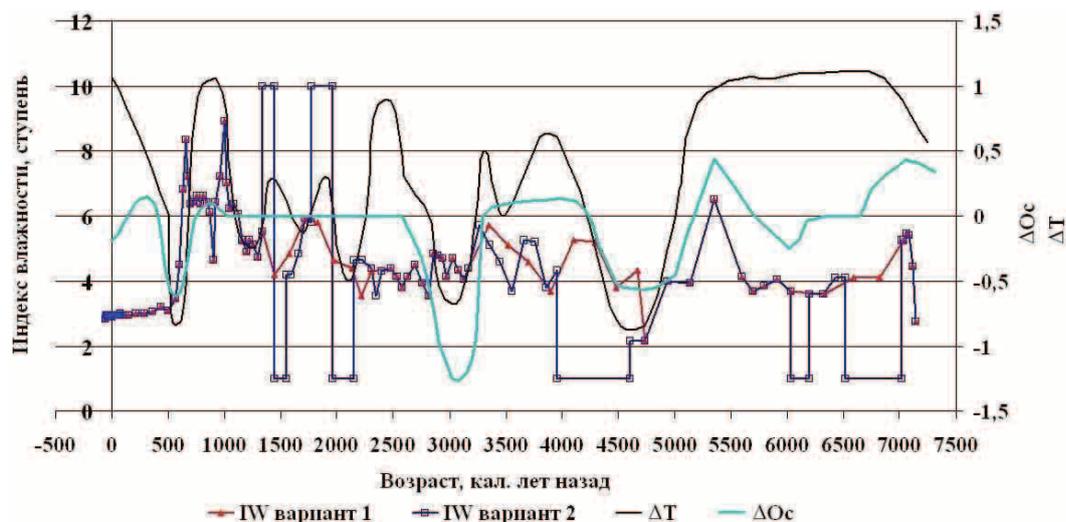


Рис. 5. Динамика палеогидрологического режима Средне-Васюганского болота и палеоклиматические кривые для лесной зоны Западной Сибири [38] по двум вариантам расчета: 1) с равномерным торфонакоплением; 2) с перерывами торфонакопления. ΔT – средняя температура года и ΔO_c – сумма осадков за год приведены как отклонения от современных показателей, в относительных величинах

Fig. 5. Dynamics of paleohydrologic mode of Sredne-vasyuganskoe bog and paleoclimatic curves for forest are in Western Siberia [38] by two variants of calculation: 1) with equal peat accumulation; 2) with breaks in peat accumulation. ΔT – the average temperature of the year and ΔO_c – the total precipitation per year are given as deviations from current indices, in relative values

Канаде [54–56], 1600–1500 л. н. – в северных и арктических регионах Финляндии [57].

Косвенным подтверждением наличия перерывов торфонакопления является практически исчезновение полученной по первому варианту расчетов значительной асинхронности трендов реконструированных водных режимов (*IW*) болотных экотопов и влажностного режима регионального палеоклимата голоцена (рис. 4, вар. 1) при пересчете с допущением наличия перерывов торфонакопления (рис. 4, вар. 2).

Динамика палеосообществ, водных режимов и торфонакопления

Наиболее соответствует динамике показателей свойств торфа, *IW* и торфонакопления следующий сценарий развития. На хорошо дренированной песчаной террасе заболачивание березового леса через мезотрофное ерниково-пушицево-сфагновое сообщество со *Sphagnum fuscum* началось около 7145 кал. л. н. (6270 ± 86 л.н.), в конце глобального похолодания АТ4 [58, 59], и инициировалось возрастанием глубины протаивания ММ грунтов и формированием надмерзлотной ворховодки. В начале последующего потепления около 7090 кал. л. н. при деградации ММ из-за неравномерной усадки грунтов сначала сформировалась комплексная мезотрофно-эвтрофная сосново-березово-осоковая согра с рогозом в сильно обводненных межствольных понижениях, затем, по мере возрастания дренирования территории, возросло обилие осок (*Carex cespitosa*, *C. lasiocarpa*, *C. rostrata*, *C. appropinquata*), и около 7040 кал. л. н. (6145 ± 92 л. н.) торфонакопление прекратилось. В этот кратковременный период развития скорость торфонакопления была высокой.

Следующий 1100-летний период, соответствующий теплоте, но недостаточно влажному концу АТ и началу глобального похолодания на границе АТ/SB [38, 60, 61], был неблагоприятен для торфонакопления на исследуемом участке болота. Вероятнее всего, торфонакопление возобновилось в мезотрофном облесенном пушицево-сфагновом сообществе в период непродолжительного похолодания около 6520 кал. л. н. (5700 л. н.) [62]. Согласно расчетным данным, около 6230 кал. л. н. (5500 л. н.), в термический максимум голоцена [61], произошло обсыхание и возрастание облесенности поверхности и торфонакопление прекратилось вплоть до следующего похолодания около 6030 кал. л. н. (5200 л. н.) [60, 61].

В холодный, в основном сухой период конца АТ3 и SB1 до 4600 кал. л. н. (около 4100 л. н.) V_{np} и $V_{ак}$ также были низкими (0,23 мм/год, 17,7 г/м² в год). В олиготрофных пушицевых сообществах с единичными соснами и березами в условиях резкопеременного режима увлажнения отлагались торфа с высокими *R* и *P*. Лишь в середине периода, около 5350 кал. л.н. (4620 л. н.), в кратковременное влажное потепление возникла шейхцериевая топь. Около 4600 кал. л.н. (4100 л. н.), в экстремум сухого похолодания [38], произошло промерзание и пучение крупного ММ бугра пучения, а в начале последующего потепления – озера. Торфонакопление отсутствовало около 650 лет. Около 3960 кал. л. н. озеро заросло слабооблесенной мозаичной шейхцерииво-сфагновой топью со значительным участием *Sphagnum fuscum*.

В последующий период, сначала теплый SB2, а затем прохладный SB3, в условиях некоторого повышения влажности климата возросло обилие то-

пяного мха *Sphagnum balticum*. Однако, вероятно в связи с незначительной толщиной слоя торфа, болото продолжало чутко реагировать даже на кратковременные периоды аридизации. Об этом свидетельствует формирование прослоек пушицевого торфа около 3860 и 3550 кал. л. н. (3565 и 3320 л. н.) и относительно высокие показатели R и P торфа. Соответственно, невысокими были $V_{\text{пр}}$ и $V_{\text{ак}} C$ (0,51 мм/год и 23,0 г/м² в год).

Около 3170 кал. л. н. (2987±63 л. н.), в условиях сухого глобального похолодания на границе SB/SA [38, 59], возросло обилие пушицы. Однако здесь, в отличие от других исследованных нами разрезов данного региона, торфонакопление не прекратилось. Около 2970 кал. л. н. (2850 л. н.) обводненность болота повысилась, судя по возрастанию обилия *Sphagnum angustifolium* и понижению R и P торфа. Вероятно, это было обусловлено уменьшением континентальности климата. $V_{\text{пр}}$ и $V_{\text{ак}} C$ достигли максимальных значений (1,13 мм/год и 45 г/м² в год).

Около 2815 кал. л. н. (2659 ± 63 л. н.), вероятно, возрастание континентальности климата обусловило быструю смену на сообщество со *Sphagnum fuscum*. Стадия была непродолжительной. Около 2690 кал. л. н. (2600 л. н.) в условиях влажного потепления [38] обводненность возросла, появились топяные сфагновые мхи (*Sphagnum balticum*, *S. majus*). Однако около 2490 кал. л. н. (2435±54 л. н.), судя по возрастанию облесенности, обилия пушицы, R и P торфа, началось обсыхание болота, продолжавшееся, согласно расчетам, до 2150 кал. л. н. (2140 л. н.). В эти периоды уменьшились $V_{\text{пр}}$ и $V_{\text{ак}} C$ (0,76–0,58 мм/год и 27,4 г/м² в год). В конце стадии в условиях сухого похолодания [38] произошло промерзание торфяной залежи и пучение крупного бугра с прекращением торфонакопления, а в последующий теплый период – формирование термокарстового озера, которое около 1850 л. н. заросло мозаичной сфагновой топью со *Sphagnum angustifolium* и *S. balticum*.

Около 1550 кал. л. н. (1660 л. н.) в условиях похолодания [38] вновь было проявление аналогичных криогенных процессов, но с менее продолжительным прекращением торфонакопления.

Уже около 1340 кал. л. н. (1431 ± 59 л. н.), в условиях начавшейся аридизации климата [38], термокарстовое озеро заросло мозаичной сплавной из *Sphagnum angustifolium*, *S. magellanicum* и *S. balticum*. Эта сплавина просуществовала в условиях прохладного климата практически в неизменном виде до 1080 кал. л. н. (1180 л. н.). $V_{\text{пр}}$ и $V_{\text{ак}} C$ повысились (1,16 мм/год и 36,5 г/м² в год).

В последующий теплый, влажный период малого климатического оптимума SA3 [38] появился *S. fallax*, а около 1000 кал. л. н. (1063±68 л. н.) сформировалась проточная, судя по возрастанию R и P , топь со *S. majus*. Однако уже через 40 лет абсолютным доминантом мохового покрова стал *Sphagnum balticum*, и в таком, практически неизмен-

ном, виде топь существовала в прохладных влажных условиях Малого Ледникового Периода (МЛП). Были лишь две кратковременные стадии изменения водного режима: около 900 кал. л. н. – уменьшение обводненности, с формированием пушицево-сфагнуовой топи, и около 670 кал. л. н. – значительного ее возрастания, с доминированием *S. majus* и, вполне вероятно, кратковременно существовавшим озерком. $V_{\text{пр}}$ и $V_{\text{ак}} C$ еще повысились (1,71 мм/год и 40,6 г/м² в год).

Около 590 кал. л. н. в период одного из сухих минимумов МЛП началось обсыхание болота, доминирование менее гидрофильного *Sphagnum magellanicum*, а около 560 кал. л. н. (513 ± 65 л. н.) сформировалось сообщество со *Sphagnum fuscum*, существующее до настоящего времени. В это время на многих южнотаежных и даже подтаежных болотах: Бакчарское, Еловочное, Аргатьюл, Темное [10–12], происходило пучение крупных ММ бугров с прекращением торфонакопления. На исследуемом болоте $V_{\text{пр}}$ и $V_{\text{ак}} C$ лишь понизились до 0,75 мм/год и 20,8 г/м² в год. При этом немного повысилась R , а P стала непропорционально высокой – до 68, при типичной 30–40 г/дм³ для фускум-торфа верхних слоев залежей. Это позволяет нам высказать предположение о формировании многолетнемерзлого мелкого сфагнуового бугра пучения.

Около 90 кал. л. н. (116±1 л. н.) наступила современная талая стадия низкого ярама и начал отлагаться практически неразложившийся фускум-торф. $V_{\text{пр}}$ и $V_{\text{ак}} C$ повысились до 2,71 мм/год и 43,3 г/м² в год.

Выводы

На основании реконструкции динамики растительных сообществ, водного режима и аккумуляции торфа и углерода среднетаежного олиготрофного Средне-Васюганского болота выявлены:

- многочисленные нарушения аутогенного развития болота частыми (вековыми и внутривековыми) сменами гидротермического режима климата и палеокриогенными процессами;
- инициация и пульсирующий характер заболачивания хорошо дренированной песчаной террасы под влиянием деградации многолетнемерзлого водоупора около 7145 кал. л. н. и его формирования около 6520 кал. л. н.;
- прерывистый характер накопления торфа и C с неоднократными прекращениями около 4600–3960, 2150–1770 и 1550–1340 кал. л. н. в связи с формированием крупных многолетнемерзлых бугров пучения в сухие похолодания и термокарстовых озер в последующие потепления;
- максимальная активизация процесса накопления ОВ верхового торфа (77,6–92,2 г/м² в год) и C (36,6–45,0 г/м² в год) во влажные, как прохладные (около 2930 и 1340 кал. л. н.), так и теплый (около 1000 кал. л. н.) периоды;
- максимально влажные стадии развития (кроме термокарстовых озер и стадий зарастания их

сплавинами) около 5350, 3760, 3264, 3025, 2852, 1120–920, 870–600 кал. л. н.;

- максимальное влияние на функциональное состояние болота сухих похолоданий и влажных потеплений.

Полученные данные реконструкции функционального состояния болота в основном хорошо согласуются с данными реконструкций регионально и глобального климата голоцена.

Учет палеокриогенных процессов, использование авторской радиоуглеродной базы данных пале-

остратиграфических рубежей в торфяных отложениях лесной зоны Западной Сибири и предлагаемой методики расчета послойных интерполяционных дат по скорости аккумуляции ОБ торфа слоев-аналогов позволили значительно повысить качество реконструкции функционального состояния болота, получить объективные данные по динамике аккумуляции торфа и С.

Автор выражает благодарность болотоведу, канд. биол. наук В.А. Базанову за предоставленный для исследования торфяной керн Средне-Васюганского болота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников М.К. Осоково-гипновые болота Западного Васюганья (Нарымский край) // Бюл. Ин-та луговой и болотной культуры им. проф. В.Р. Вильямса. – 1929. – Вып. 2. – 37 с.
2. Львов Ю.А. Болота Тым-Вахского междуречья // Природа и экономика севера Томской области (Материалы комплексной экспедиции по изучению природных условий, естественных ресурсов и экономики нефтегазоносных районов Томской области). – Томск, Изд-во Том. ун-та, 1977. – С. 118–133.
3. Мульдьяров Е.Я. Мерзлотный торфяник на междуречье Кети и Чулыма // Ледники и климат. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1987. – С. 84–85.
4. Березин А.Е. Болота бассейна Среднего и Верхнего Васюгана // Чтения памяти Ю.А. Львова: Сб. статей / под ред. Г.Ф. Плеханова. – Томск: Из-во НИИ Биологии и Биофизики при Томском гос. университете, 1995. – С. 56–59.
5. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Современные криоморфозы в ландшафтах южной тайги Западной Сибири // География и природные ресурсы. – 2007. – № 1. – С. 96–100.
6. Васильчук Ю.В. Современное положение южной границы зоны многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской низменности // Криосфера Земли. – 2013. – Т. XVII. – № 1. – С. 17–27.
7. Прейс Ю.И. Криогенез болотообразовательного процесса на территории Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 45–63.
8. Прейс Ю.И., Карпенко Л.В. Особенности стратиграфии, динамики и генезиса олиготрофного грядово-мочажинного комплекса в междуречье Оби и Васюгана (среднетаежная подзона Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 48–53.
9. Прейс Ю.И. Региональные особенности болотообразовательного процесса в лесной зоне Западной Сибири // Актуальные проблемы геоботаники: Тезисы докладов III Всерос. школы-конф. – Петрозаводск, 2007. – Т. 2. – С. 132–136.
10. Оценка потоков минерального вещества по свойствам торфяных отложений Бакчарского болота (южная тайга Западной Сибири) / Ю.И. Прейс, В.А. Бобров, В.В. Будашкина, В.М. Гавшин // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 43–47.
11. Прейс Ю.И., Курьина И.В. Реконструкция высокого разрешения палеозокопов болот южной тайги Западной Сибири как отклик на изменения климата голоцена // Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота / под ред. М.В. Кабанова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – С. 14–38.
12. Прейс Ю.И. Палеокриогенные процессы в торфяных отложениях юга лесной зоны Западной Сибири // Климатология и гляциология Сибири: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2012. – С. 226–227.
13. Васильчук А.К. Палинология и хронология полигонально-жильных комплексов в криолитозоне России. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. – 488 с.
14. Нейштадт М.И. Мировой природный феномен – заболоченность Западно-Сибирской равнины // Известия АН СССР. – Сер. география. – 1971. – № 1. – С. 21–34.
15. Гиличинский Д.А. Сезонная криолитозона Западной Сибири. – М.: Наука, 1986. – 143 с.
16. Коженкова З.П., Рутковская Н.В. Климат Томской области и его формирование // Вопросы географии Сибири. – Томск: Изд-во Томского университета, 1966. – Вып. 6. – С. 3–39.
17. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 05.09.2014).
18. Торфяные месторождения и их разведка / С.Н. Тюрмнов, И.Ф. Ларгин, С.Ф. Ефимова, Е.И. Скобева. – М.: Недра, 1977. – 264 с.
19. Липштан И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. – Минск: Наука и техника, 1975. – 318 с.
20. Stuiver M., Reimer P.J. CALIB 5.0.1 Calib Radiocarbon Calibration Program. 1989–2005.
21. Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W. CALIB 5.0.1 Manual. – 2005. URL: <http://www.calib.qub.ac.uk/crev50/manual/> (дата обращения: 21.02.2011).
22. Елина Г.А., Юрковская Т.К. Методы определения палеогидрологического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот // Ботанический журнал. – 1992. – Т. 77. – № 7. – С. 120–124.
23. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук, Н.А. Буданцева, Ю.Н. Чижова / под ред. Ю.К. Васильчука. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 571 с.
24. Preis Yu.I., Antropova N.A. Permafrost as a main factor of formation of Western Siberia peatlands // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Матер. Междунар. полевого симпозиума. – Ноябрьск, 2001. – С. 197–201.
25. Малясова Е.С., Новиков С.М., Усова Л.И. Динамика торфонакопления и процесс образования бугристых болот Западной Сибири // Ботанический журнал. – 1991. – Т. 76. – № 9. – С. 1227–1237.
26. Тыртиков А.П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. – 192 с.
27. Тыртиков А.П. Лес на северном пределе в Азии. – М.: КМК, 1995. – 144 с.
28. Vitt D.H., Halsey L.A., Zoltai S.C. The Bog Landforms of Continental Western Canada in Relation to Climate and Permafrost Patterns // Arctic and Alpine Research. – 1994. – V. 26. – № 1. – P. 1–13.
29. Косых Н.П., Мироничева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. Биологическая продуктивность болот лесотундры Западной Сиби-

- ри // Вестник Томского гос. пед. ун-та. – 2008. – Вып. 4. – № 78. – С. 53–57.
30. Косых Н.П., Коронатова Н.Г. Изменение линейного прироста и продукции двух видов сфагновых мхов по широтному градиенту // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Матер. Четвертого Междунар. полевого симпозиума. – Новосибирск, 2014. – С. 186–188.
 31. The disappearance of relict permafrost in boreal North America: effects on peatland carbon storage and fluxes / M.R. Turetsky, R.K. Wieder, D.H. Vitt, R.J. Evans, K.D. Scott // *Global Change Biology*. – 2007. – V. 13. – № 9. – P. 1922–1934.
 32. Robinson S.D., Moore T.R. The influence of permafrost and fire upon carbon accumulation in high boreal peatlands, Northwest Territories, Canada // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2000. – V. 32. – № 2. – P. 155–166.
 33. Lamarre A., Garneau M., Asnong H. Holocene paleohydrological reconstruction and carbon accumulation of a permafrost peatland using testate amoeba and macrofossil analyses, Kuujuarapik, subarctic Quebec, Canada // *Review of Palaeobotany and Palynology*. – 2012. – V. 186. – P. 131–141.
 34. Hunt S., Yu Z., Jones M. Lateglacial and Holocene climate, disturbance and permafrost peatland dynamics on the Seward Peninsula, western Alaska // *Quaternary Science Reviews*. – 2013. – V. 63. – № 1. – P. 42–58.
 35. A 2200-Year Record of Permafrost Dynamics and Carbon Cycling in a Collapse-Scar Bog, Interior Alaska / M.C. Jones, R.K. Booth, Z. Yu, P. Ferry // *Ecosystems*. – 2013. – V. 16. – Iss. 1. – P. 1–19.
 36. Lapshina E.D., Pologova N.N. Carbon accumulation // *Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands* / eds. W. Bleuten, E.D. Lapshina – Utrecht: Utrecht University Press, 2001. – P. 50–68.
 37. Преис Ю.И. Палеостратиграфические рубежи в торфяных отложениях Западной Сибири // Десятое Сибирское совещание по климатологическому мониторингу: Тезисы Рос. конф. – Томск, 2013. – С. 251–253.
 38. Волкова В.С., Гнибиденко З.Н., Горячева А.А. Климатическая ритмика голоцена центральной части Западно-Сибирской равнины (палинология, магнетизм) // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. – Новосибирск: Изд-во Института археологии и этнографии СО РАН, 2002. – С. 48–57.
 39. Clymo R.S. Limits to peat bog growth // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*. – 1984. – V. 303. – P. 605–654.
 40. Kubiw H., Hickman M., Vitt D.H. The developmental history of peatlands at Muskiki and Marguerite lakes, Alberta // *Canadian Journal of Botany*. – 1989. – V. 67. – P. 3534–3544.
 41. Kuhry P. The palaeoecology of a treed bog in western boreal Canada: a study based on microfossils, macrofossils and physico-chemical properties // *Review of Palaeobotany and Palynology*. – 1997. – V. 6. – P. 183–224.
 42. Kuhry P., Vitt D.H. Fossils carbon/nitrogen ratios as a measure of peat decomposition // *Ecology*. – 1996. – V. 77. – P. 271–275.
 43. Carbon sequestration in western Canadian peat highly sensitive to Holocene wet-dry climate cycles at millennial timescales / Z. Yu, I.D. Campbell, C. Campbell, D.H. Vitt, G.C. Bond, M.J. Apps // *The Holocene*. – 2003. – V. 13. – № 6. – P. 801–808.
 44. Blyakharchuk T.A., Sulzerzhitsky L.D. Holocene vegetational and climatic changes in the forest zone of Western Siberia according to pollen records from the extrazonal palsa bog Bugristoye // *The Holocene*. – 1999. – V. 9. – № 5. – P. 621–628.
 45. Salmi M. Present development stages of palsas in Finland // *Virgin peatlands: The Proceedings of the 4th International Peat Congress*. – Otaniemi, Finland, 1972. – V. 1. – P. 121–141.
 46. Радиоуглеродные датировки и голоценовая динамика бугров пучения в долине реки Уса / Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук, Н.А. Буданцева, Е.М. Волкова, Л.Д. Сулержицкий, Ю.Н. Чижова, Х. Юнгер // *Доклады Российской АН*. – 2002. – Т. 384. – № 3. – С. 396–401.
 47. Bhiry N., Payette S., Robert E.C. Peatland development at the arctic tree line (Qu?bec, Canada) influenced by flooding and permafrost // *Quaternary Research*. – 2007. – V. 67. – P. 426–437.
 48. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Сулержицкий Л.Д. Радиоуглеродная хронология бугров пучения Большеземельской тундры // *Доклады Академии наук*. – 2003. – Т. 393. – № 1. – С. 101–105.
 49. Oksanen P.O., Kuhry P., Alekseeva R.N. Holocene development of the Rogovaya River peat plateau, East-European Russian Arctic // *The Holocene*. – 2001. – V. 11. – № 1. – P. 25–40.
 50. Oksanen P.O., Kuhry P., Alekseeva R.N. Holocene development and permafrost history of the Usinsk mire, northeast European Russia // *Geographie Physique et Quaternaire*. – 2003 – V. 57. – № 2–3. – P. 169–187.
 51. European Russian Arctic / J. Routh, G. Hugelius, P. Kuhry, T. Filley, P.K. Tillman, M. Becher, P. Crill // *Chemical Geology*. – 2014. – V. 368. – P. 104–117.
 52. Payette S., Filion L. Holocene water-level fluctuations of a subarctic lake at the tree line in northern Quebec // *Boreas*. – 1993. – V. 22. – Iss. 1. – P. 7–14.
 53. Kuhry P. Late Holocene permafrost dynamics in two Subarctic peatlands of the Hudson Bay Lowlands (Manitoba, Canada) // *Eurasian soil science*. – 1998. – V. 31. – № 5. – P. 529–534.
 54. Washburn A.L., Stuiver M. Radiocarbon dates from Cornwallis Island area, Arctic Canada – an interim report // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1985. – V. 22. – № 4. – P. 630–637.
 55. Payette S., Delwaide A. Recent permafrost Dynamics of subarctic wetlands forests over the past 1500 years // *Ecological Monographs*. – 2004. – V. 74. – P. 373–391.
 56. Bhiry N., Robert E.C. Reconstruction of changes in vegetation and trophic conditions of a palsa in a permafrost peatland, subarctic Quebec, Canada // *Écoscience*. – 2006. – V. 13. – № 1. – P. 56–65.
 57. Seppälä M. Palsa mires in Finland // *The Finnish environment*. – 2006. – V. 23. – P. 155–162.
 58. Зубаков В.А. Глобальные климатические события плейстоцена. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 288 с.
 59. Карпенко Л.В. Взаимосмены леса и болота в среднетаежной части Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Красноярск, 1997. – 19 с.
 60. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии: опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата. – М.: Наука, 1977. – 200 с.
 61. Климанов В.А. Особенности изменения климата Северной Евразии в позднеледниковье и голоцене // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение геологии*. – 1994. – Т. 69. – Вып. 1. – С. 58–62.
 62. Клименко В.В., Климанов В.А., Федоров М.В. История средней температуры Северного полушария за последние 11000 лет // *Доклады РАН*. – 1996. – Т. 348. – № 1. – С. 111–114.

Поступила 13.11.2014 г.

UDK 556.56:551.583:56.074.6(571.1)

DETAILED RECONSTRUCTION OF BOG FUNCTIONAL STATE AS RESPONSE TO CONTINENTAL CLIMATE CHANGES IN HOLOCENE (THE MIDDLE TAIGA OF WEST SIBERIA)

Yulia I. Preis,

Cand. Sc., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
10/3, Academicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia.
E-mail: preisui@rambler.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to develop short-term forecasts of the landscape functional state and climate of Western Siberia considering regional mire response to the changes in the Holocene climate.

The main aim of the study is the detailed reconstruction of the dynamics of plant communities, water regimes and peat accumulation of middle taiga bog considering the influence of paleocryogenic processes.

The methods used in the study: detailed (1–5 cm) study of the macrofossils composition and physico-chemical properties of peat, radiocarbon dating (13 dates) peat deposits; reconstruction of phytocenoses and water regimes by traditional paleoecological methods, reconstruction of paleocryogenic processes based on the system-evolutionary methodical approach of searching violations in autogenous mire development and complex of bio-indicators from permafrost zone; author's method of adjusting the chronology with account of peat accumulation stopping; comparative analysis of the obtained data and regional climate reconstructions.

The results. The author has carried out the reconstruction of the dynamics of plant communities, water regime and peat and carbon accumulation and identified numerous violations of autogenous bog development caused by frequent changes in climate hydrothermal regime and paleocryogenic processes. Initiation and pulsating character of paludification of well-drained sandy terraces are caused by the influence of degradation of waterproof permafrost ca. 7145 cal. BP, and its formation ca. 6520 cal. BP. Peat accumulation stopping ca. 4600–3950, 2150–1770 and 1550–1340 cal. BP is conditioned by formation of Palsa in dry cooling and thermokarst pools in the subsequent warming. Along with pools and their floating, the wettest stages of development were ca. 5350, 3760, 3264, 3025, 2852, 1120–920, 870–600 cal. BP. Long-term carbon accumulation rate is equal to 20,4 g m² yr⁻¹ with maximum rates 40,6–45,0 g m² yr⁻¹ in cooling, mostly wet ca. 3170–2815 cal. BP, wet warming and cooling ca. 1000–560 cal. BP. It was shown that account of paleocryogenic processes, use of date-analogs and peat layer-analogs can significantly improve the quality of the reconstruction of the mire functional state and obtain objective dates on dynamics of peat and C accumulation.

Key words:

Peat deposit, reconstruction, plant communities, water regime, peat accumulation, permafrost, climate, Holocene, middle taiga, Western Siberia.

The author gives thanks to a bog scientist, V.A. Bazanov, Cand. Sc., for peat core of Sredne-Vasyuganskoe bog.

REFERENCES

1. Baryshnikov M.K. Osokovo-gipnovye bolota Zapadnogo Vasyugania (Narymsky kray) [Sedge-hypnum mire of West Vasyuganie (Narymsky edge)]. *Bulleten Instituta lugovoy i bolotnoy kulturi Prof. V.R.Vilyamsa*, 1929, vol. 2, 37 p.
2. Lvov Yu.A. Bolota Tym-Vakhskogo mezhdurechya [Mires of Tym-Vakh rivers interfluv]. *Priroda i ekonomika severa Tomskoy oblasti (materiali kompleksnoy ekspeditsii po izucheniyu prirodnykh uslovy, estestvennykh resursov i ekonomiki neftegazonnykh rayonov Tomskoy oblasti)* [Nature and economy of the north of Tomsk area (materials complex expedition for studying the natural environment, natural resources and economy of oil and gas areas of the Tomsk area)]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1977. pp. 118–133.
3. Muldiyarov E.Ya. Merzlotny torfyanik na mezhdureche Ket i Chulima [Permafrost peatland in the area between Ket and Chulym]. *Ledniki i klimat*. Tomsk, Tomsk University Publ., 1987. pp. 84–85.
4. Berezin A.E. Bolota basseyna Srednego i Verkhnego Vasyugana [Mires of basin of Middle and Upper Vasyugan]. *Chiteniya pamyati Yu.A. Lvova: Sbornik statey*. Ed. by G.F. Plekhanov. Tomsk, Research Institute of Biology and Biophysics of Tomsk University Publ., 1995. pp. 56–59.
5. Dyukarev A.G., Pologova N.N. sovremennyye kriomorfozy v ladshafakh yuzhnoy taigi Zapadnoy Sibiri [Contemporaneous cryomorphoses in landscapes of southern taiga in West Siberia]. *Geografiya i prirodniy resursy – Geography and Natural Resources*, 2007, no. 1, pp. 96–100.
6. Vasilchuk Yu.V. Sovremennoe pologenie yuzhnoy granitsi zony mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Current situation of the southern boundary of the permafrost zone of the West Siberian Lowland]. *Kriosfera Zemli*, 2013, vol. XVII, no. 1, pp. 17–27.
7. Preis Yu.I. Kriogenez bolotoobrazovatel'nogo protsesssa na territorii Bolshogo Vasyuganskogo bolota [Cryogenesis of mire formation in the Great Vasyugan bog]. *Bolshoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [The Great Vasyugan Bog. Current status and evolution processes]. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics of SB RAN Publ., 2002. pp. 45–63.
8. Preis Yu.I., Karpenko L.V. Osobennosti stratigrafii, dinamiki i genezisa oligotrofnogo gryadovo-mochazhinnogo kompleksa v mezhdureche Obi i Vasyugana (srednetazhnaya podzona Zapadnoy Sibiri) [Features of stratigraphy, dynamics and genesis of the oligotrophic ridge-hollow complex in the interfluv of the Ob and the Vasyugan rivers (middle taiga subzone of Western Siberia)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 1, pp. 48–53.
9. Preis Yu.I. Regionalnye osobennosti bolotoobrazovatel'nogo protsesssa v lesnoy zone Zapadnoy Sibiri [Regional features of mire formation in the forest zone of Western Siberia]. *Tezisy dokladov III Vserossiyskoy shkoly-konferentsii «Aktualnye problemy geobotaniki»* [Abstr. 3rd All-Rus. School-Conf. Actual problems of Geobotany]. Petrozavodsk, 2007. Vol. 2, pp. 132–136.
10. Preis Yu.I., Bobrov V.A., Budashkina V.V., Gavshin V.M. Otsenka potokov mineralnogo veshchestva po svoystvam torfyanikykh

- otlozheniy Bakcharskogo bolota (yuzhnaya tayga Zapadnoy Sibiri) [Estimate of flows of mineral matter by the properties of peat deposits of Bakchar bog (southern taiga of Western Siberia)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 43–47.
11. Preis Yu.I., Kurina I.V. Rekonstruktsiya vysokogo razresheniya paleoekotopov bolot yuzhnoy taygi Zapadnoy Sibiri kak otklik na izmeneniya klimata golotsena [High-resolution reconstruction of mire paleoecotopes of southern taiga of Western Siberia as a response to Holocene climate change]. *Issledovanie prirodno-klimaticheskikh protsessov na territorii Bolshogo Vasyuganskogo bolota* [Research of Natural and Climatic Processes on the Great Vasyugan Mire]. Ed. by M.V. Kabanov. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2012. pp. 14–38.
 12. Preis Yu.I. Paleokriogennye protsessy v torfyanykh otlozheniyakh yuga lesnoy zony Zapadnoy Sibiri [Paleocryogenic processes in peat sediments of southern forest zone of Western Siberia]. *Materialy Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii «Klimatologiya i glyatsiologiya Sibiri»* [Proc. Int. Scient. and Pract. Conf. Climatology and glaciology of Siberia]. Tomsk, 2012. pp. 226–227.
 13. Vasilchuk A.K. *Palinologiya i khronologiya poligonalno-zhilnykh kompleksov v kriolitozone Rossii* [Palynology and chronology of polygonal ice wedge complexes in Russia permafrost area]. Moscow, Moscow University Press, 2007. 488 p.
 14. Neustadt M.I. Mirovoy pripodny fenomen – zabolochennost Zapadno-Sibirskoy ravniny [World natural phenomenon – paludification of West Siberian plain]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR ser. Geografiya. – Bulletin of USSR Academy of Science. Geography*, 1971, no. 1, pp. 21–34.
 15. Gilichinskiy D.A. *Sezonnaya kriolitozona Zapadnoy Sibiri* [Seasonal permafrost area in Western Siberia]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 143 p.
 16. Kozhenkova Z.P., Rutkovskaya N.V. Klimat Tomskoy oblasti i ego formirovaniye [The climate of the Tomsk region and its formation]. *Voprosy geografii Sibiri* [Questions of geography of Siberia]. Tomsk, Tomsk University Press, 1966. Vol. 6, pp. 3–39.
 17. The All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Available at: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (accessed 05 September 2014).
 18. Tyuremnov S.N., Largin I.F., Efimova S.F., Skobeeva E.I. *Torfyanye mestorozhdeniya i ikh razvedka* [Peat deposits and their exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 264 p.
 19. Lishtvan I.I., Korol N.T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 318 p.
 20. Stuiver M., Reimer P.J. 1989–2005, CALIB 5.0.1 Calib Radicarbon Calibration Program.
 21. Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W. 2005, CALIB 5.0.1 Manual. Available at: <http://www.calib.qub.ac.uk/crev50/manual/> (accessed 21 February 2011).
 22. Elina G.A., Yurkovskaya T.K. Metody opredeleniya paleogidrologicheskogo rezhima kak osnova obektivizatsii prichin suksessiy rastitelnosti bolot [Methods for determining paleogidrological regime as the basis objectification of the causes of mire vegetation successions]. *Botanicheskii zhurnal*, 1992, vol. 77, no. 7, pp. 120–124.
 23. Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.K., Budantseva N.A., Chizhova Yu.N. *Vypuklye bugry pucheniya mnogoletnemerzlykh torfyanykh massivov* [Palsa of frozen peat mires]. Ed. by Yu.K. Vasilchuk. Moscow, Moscow University Press, 2008. 571 p.
 24. Preis Yu.I., Antropova N.A. Permafrost as a main factor of formation of Western Siberia peatlands. *Materialy Mezhdunarodnogo polevogo simpoziuma «Torfyanyki Zapadnoy Sibiri i tsikl ugleroda: proshloe i nastoyashchee»* [Proc. Int. field symp. West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present]. Novyabrsk, 2001. pp. 197–201.
 25. Malyasova E.S., Novikov S.M., Usova L.I. Dinamika torfonakopleniya i protsess obrazovaniya bugristykh bolot Zapadnoy Sibiri [Dynamics of peat accumulation and palsa mires formation of Western Siberia]. *Botanicheskii zhurnal*, 1991, vol. 76, no. 9, pp. 1227–1237.
 26. Tyrtikov A.P. *Vliyanie rastitelnogo pokrova na promerzanie i protaivanie gruntov* [Vegetation effects on freezing and thawing of soils]. Moscow, Moscow University Press, 1969. 192 p.
 27. Tyrtikov A.P. *Les na severnom predele v Azii* [Forest at the northern limit in Asia]. Moscow, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 1995. 144 p.
 28. Vitt D.H., Halsey L.A. and Zoltai S.C. The Bog Landforms of Continental Western Canada in Relation to Climate and Permafrost Patterns. *Arctic and Alpine Research*, 1994, vol. 26, no. 1, pp. 1–13.
 29. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Parshina E.K. Biologicheskaya produktivnost bolot lesotundry Zapadnoy Sibiri [Biological productivity of forest-tundra mires in Western Siberia]. *Vestnik Tomskogo gos. pedagogicheskogo universiteta. – Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2008, vol. 4, no. 78, pp. 53–57.
 30. Kosykh N.P., Koronatova N.G. Izmeneniye lineynogo prirosta i produktssii dvukh vidov sfagnovykh mkhov po shirotnomu gradientu [Changing of linear growth and production of two species of sphagnum moss on the latitudinal gradient]. *Materialy Chetvertogo Mezhdunarodnogo polevogo simpoziuma «Torfyanyki Zapadnoy Sibiri i tsikl ugleroda: proshloe i nastoyashchee»* [Proc. 4th Int. field symp. West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present]. Novosibirsk, 2014. pp. 186–188.
 31. Turetsky M.R., Wieder R.K., Vitt D.H., Evans R.J., Scott K.D. The disappearance of relict permafrost in boreal North America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology*, 2007, vol. 13, no. 9, pp. 1922–1934.
 32. Robinson S.D., Moore T.R. The influence of permafrost and fire upon carbon accumulation in high boreal peatlands, Northwest Territories, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2000, vol. 32, no. 2, pp. 155–166.
 33. Lamarre A., Garneau M., Asnong H. Holocene paleohydrological reconstruction and carbon accumulation of a permafrost peatland using testate amoeba and macrofossil analyses, Kuujuaupik, subarctic Quebec, Canada. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2012, vol. 186, pp. 131–141.
 34. Hunt S., Yu Z., Jones M. Lateglacial and Holocene climate, disturbance and permafrost peatland dynamics on the Seward Peninsula, western Alaska. *Quaternary Science Reviews*, 2013, vol. 63, no. 1, pp. 42–58.
 35. Jones M.C., Booth R.K., Yu Z., Ferry P.A. 2200-Year Record of Permafrost Dynamics and Carbon Cycling in a Collapse-Scar Bog, Interior Alaska. *Ecosystems*, 2013, vol. 16, Iss. 1, pp. 1–19.
 36. Lapshina E.D., Pologova N.N. Carbon accumulation. *Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands*. Eds. W. Bleuten, E.D. Lapshina. Utrecht, Utrecht University Press, 2001. pp. 50–68.
 37. Preys Yu.I. Paleostratigraficheskie rubezhi v torfyanykh otlozheniyakh Zapadnoy Sibiri [Paleostratigraphic boundaries in peat deposits of Western Siberia]. Tezisy rossiyskoy konferentsii «Desyatoe sibirskoe soveshchanie po klimato-ecologicheskomu monitoringu» [Book of abstracts of Russian conf. The 10th Siberian Meeting on climatic and environmental monitoring]. Tomsk, 2013. pp. 251–253.
 38. Volkova V.S., Gnibidenko Z.N., Goryacheva A.A. Klimaticheskaya ritmika golotsena tsentralnoy chasti Zapadno-Sibirskoy ravniny (palinologiya, magnetizm) [Holocene climatic rhythm of the central part of the West Siberian Plain (palynology, magnetism)]. *Osnovnye zakonomernosti globalnykh i regionalnykh izmeneniy klimata i prirodnoy sredy v pozdnem kaynozoe Sibiri* [Main regularities of global and regional climate change and the environ-

- ment in the Late Cenozoic of Siberia]. Novosibirsk, Institute of Archaeology and Ethnography SO RAN Publ., 2002. pp. 48–57.
39. Clymo R.S. The limits to peat bog growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 1984, vol. 303, pp. 605–654.
 40. Kubiw H., Hickman M., Vitt D. H. The developmental history of peatlands at Muskiki and Marguerite lakes, Alberta. *Canadian Journal of Botany*, 1989, vol. 67, pp. 3534–3544.
 41. Kuhry P. The palaeoecology of a treed bog in western boreal Canada: a study based on microfossils, macrofossils and physico-chemical properties. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1997, vol. 96, no. 1, pp. 183–224.
 42. Kuhry P., Vitt D.H. Fossils carbon/nitrogen ratios as a measure of peat decomposition. *Ecology*, 1996, vol. 77, pp. 271–275.
 43. Yu Z., Campbell I.D., Campbell C., Vitt D.H., Bond G.C., Apps M.J. Carbon sequestration in western Canadian peat highly sensitive to Holocene wet-dry climate cycles at millennial timescales. *The Holocene*, 2003, vol. 13, no. 6, pp. 801–808.
 44. Blyakharchuk T.A., Sulerzhitsky L.D. Holocene vegetational and climatic changes in the forest zone of Western Siberia according to pollen records from the extrazonal palsa bog Bugristoye. *The Holocene*, 1999, vol. 9, no. 5, pp. 621–628.
 45. Salmi M. Present development stages of palsas in Finland. *Virgin peatlands*. The Proc. of the 4th Intern. Peat Congress. Otaniemi, Finland, 1972. Vol. 1, pp. 121–141.
 46. Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.K., Budantseva N.A., Volkova E.M., Sulerzhitskiy L.D., Chizhova Yu.N., Yunger Kh. Radiouglerodnye datirovki i golotsenovaya dinamika bugrov pucheniya v doline reki Usa [Radiocarbon dating and Holocene dynamics of palsa in valley of the river Usa]. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2002, vol. 384, no. 3, pp. 396–401.
 47. Bhiry N., Payette S., Robert E.C. Peatland development at the arctic tree line (Québec, Canada) influenced by flooding and permafrost. *Quaternary Research*, 2007, vol. 67, pp. 426–437.
 48. Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.K., Sulerzhitskiy L.D. Radiouglerodnaya khronologiya bugrov pucheniya Bolshezemelskoy tundry [Radiocarbon chronology of Palsa of Bolshezemelskaya tundra]. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2003, vol. 393, no. 1, pp. 101–105.
 49. Oksanen P.O., Kuhry P., Alekseeva R.N. Holocene development of the Rogovaya River peat plateau, East-European Russian Arctic. *The Holocene*, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 25–40.
 50. Oksanen P.O., Kuhry P., Alekseeva R.N. Holocene development and permafrost history of the Usinsk mire, northeast European Russia. *Geographie Physique et Quaternaire*, 2003, vol. 57, no. 2–3, pp. 169–187.
 51. Routh J., Hugelius G., Kuhry P., Filley T., Tillman P.K., Becher M., Crill P. European Russian Arctic. *Chemical Geology*, 2014, vol. 368, pp. 104–117.
 52. Payette S., Filion L. Holocene water-level fluctuations of a subarctic lake at the tree line in northern Quebec. *Boreas*, 1993, vol. 22, Iss. 1, pp. 7–14.
 53. Kuhry P. Late Holocene permafrost dynamics in two Subarctic peatlands of the Hudson Bay Lowlands (Manitoba, Canada). *Eurasian soil science*, 1998, vol. 31, no. 5, pp. 529–534.
 54. Washburn A.L., Stuiver M. Radiocarbon dates from Cornwallis Island area, Arctic Canada – an interim report. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1985, vol. 22, no. 4, pp. 630–637.
 55. Payette S., Delwaide A. Recent permafrost Dynamics of subarctic wetlands forests over the past 1500 years. *Ecological Monographs*, 2004, vol. 74, pp. 373–391.
 56. Bhiry N., Robert E.C. Reconstruction of changes in vegetation and trophic conditions of a palsa in a permafrost peatland, subarctic Québec, Canada. *Ecoscience*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 56–65.
 57. Seppälä M. Palsa mire in Finland. *The Finnish environment*, 2006, vol. 23, pp. 155–162.
 58. Zubakov V.A. *Globalnye klimaticheskie sobitiya Pleistotsena* [Global climatic events of the Pleistocene]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 288 p.
 59. Karpenko L.V. *Vzaimosmeny lesa i bolota v srednetaezhnoy chasti Zapadnoy Sibiri*. Avtoreferat Dokt. Dis. [The mutual change of forests and mires in the middle tayga-part of Western Siberia. Dr. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 1997. 19 p.
 60. Khotinsky NA. *Golotsen Severnoy Evrazii: opyt transkontinentalnoy korrelyatsii etapov razvitiya rastitelnosti i klimata* [The Holocene of Northern Eurasia: Experience of transcontinental correlation stages of vegetation and climate]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 197 p.
 61. Klimanov V.A. Osobennosti izmeneniya klimata Severnoy Evrazii v pozdnelednikovye i golotsene [Features of climate change in Northern Eurasia in the Late Glacial and the Holocene]. *Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdelenie geologii*, 1994, vol. 69, Iss. 1, pp. 58–62.
 62. Klimenko V.V., Klimanov V.A., Fedorov M.V. Istoriya sredney temperatury Severnogo polushariya za poslednie 11000 let [Average temperature History of the Northern Hemisphere over the past 11,000 years]. *Doklady RAN*, 1996, vol. 348, no. 1, pp. 111–114.

Received: 13 November 2014.

УДК 622.248.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ НА ГИДРАТАЦИЮ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН НА ПРИМЕРЕ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА

Неверов Александр Леонидович,

канд. техн. наук, доцент каф. бурения нефтяных и газовых скважин
института нефти и газа ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный
университет», Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
E-mail: neveroff_man@mail.ru

Рожков Владимир Павлович,

д-р техн. наук, профессор каф. бурения нефтяных и газовых скважин
института нефти и газа ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный
университет», Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.
E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Каратаев Дмитрий Давидович,

начальник производственно-технологического отдела
ООО «Норильскгеология», Россия, 663330, г. Норильск, а/я 889.
E-mail: dd.karataev@norilskgeology.ru

Неверов Александр Александрович,

магистрант каф. технической физики института космических исследований
и высоких технологий ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный
аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева»,
Россия, 660014 г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: aaneverov@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследований и разработки промысловых жидкостей для бурения геолого-разведочных скважин в сложных горно-геологических условиях Талнахского рудного узла.

Цель работы: исследование влияния водных растворов простых солей и полиэлектролитов на гидратацию глинистых минералов при бурении скважин комплексами со съемными керноприемниками (КССК) на Талнахском рудном узле.

Методы исследования: методы рентген-флюоресцентной спектроскопии, электронной микроскопии, рентгеноспектрального, спектроскопического и томографического анализа для определения минерального состава глинистых горных пород; гидратация глинистых минералов на тестере продольного набухания.

Результаты. Проведены исследования гидратации монтмориллонита и иллита в растворах простых солей, водорастворимых полимерах и их комбинациях. Трансляционное движение молекул воды за счет наличия иона K^+ , обладающего отрицательной гидратацией, приводит к увеличению скорости проникновения молекул воды в поровое пространство глинистых минералов, независимо от их типов. В концентрированных растворах простых солей трансляционное движение молекул воды остается более интенсивным по сравнению с чистой водой, что приводит к дестабилизации горных пород, содержащих в своем составе глинистые минералы. Независимо от типа раствора пористость и проницаемость оказывают влияние на изменение линейных размеров глинистых образцов, что подтверждается графиками исследуемых образцов, изготовленных при разных давлениях. Полианионы и поликатионы способствуют более быстрому проникновению молекул воды в поровое пространство и далее в межплоскостное пространство глинистых минералов, что приводит практически к неограниченному набуханию. Скорость гидратации глинистых минералов замедляется в растворах, содержащих гидратирующиеся катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+}), стабилизация наступает за более длительный период, чем в случае с ионом калия.

Ключевые слова:

Гидратация, глинистый минерал, трансляционное движение молекул воды, степень набухания, самодиффузия воды, концентрированный раствор.

Основные особенности строения Талнахского рудного узла

В геолого-структурном отношении Талнахский рудный узел (ТРУ) относится к юго-западному флангу Хараелахской мульды, рассеченной с севера на юг Норильско-Хараелахским глубинным разломом – основной рудоконтролирующей структурой размещения дифференцированных рудоносных интрузий. Для ТРУ характерно интенсивное

проявление разрывной тектоники различных порядков и связанной с этим трещиноватости. Наиболее трещиноваты рассланцованные породы тунгусской серии, наименее – толстоплитчатые карбонаты девона. Ниже отметки 700 м руды и породы отнесены к удароопасным. По степени трещиноватости руды и породы ТРУ делятся на четыре категории от слаботрещиноватых до раздробленных, характеризующихся средним размером ребра эле-

ментарного блока от $\leq 0,2$ до $\leq 0,05$ м. В осадочных породах чаще всего встречаются пологие трещины, в сплошных рудах – крутопадающие. Трещины чаще всего заполнены глинистыми минералами типа хлорита, гидрослюда, смешанослойными образованиями. С приближением к структурному нарушению трещиноватость пород увеличивается, образуя зону повышенной трещиноватости шириной, равной 0,2–0,5 амплитуды смещения по данному разлому. Как правило, такие зоны ассиметричны: мощность зоны в висячем боку нарушения в 3–8 раз больше, чем в лежащем. Зоны высокой или повышенной трещиноватости мощностью до 5 м отмечены в кровле и реже в почве сплошных руд [1].

Опробование глубоких горизонтов осуществляется посредством бурения скважин комплексами со съёмными керноприемниками (КССК). При бурении горных пород разведочнинской свиты ($D_{1\text{тн}}$), тунгусской серии (C_2-P_2) и рудоносных интрузий возникают проблемы, связанные с обрушением горных пород.

Организация экспериментальных исследований

Для уточнения вещественного состава осадочных горных пород были отобраны 29 образцов керна аргиллита и хлорита с 5 скважин (ЗФ-53, ЗФ-56, ЗФ-48, РТ-11, РТ-17), глубина отбора 886–1565 м. Исследование вещественного состава и строения пород проводилось в КНЦ СО РАН и Институте горного дела, геологии и геотехнологий СФУ. Определение элементного состава проводилось на рентген-флуоресцентном спектрометре BRUKER S2 Ranger (детектируемые элементы с Na до U). Электронно-микроскопическое изучение и микроанализ выполнены на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM3000 с рентгеноспектральным анализатором BRUKER XFlash 430 H (детектируемые элементы от B до Am). Порошковые дифрактограммы образцов были сняты на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker (линейный детектор VANTEC, Cu-K α -излучение). Микроскопические исследования в проходящем свете выполнены с использованием микроскопа Axioskop 40 A Pol. Спектроскопические и томографические анализы были выполнены с помощью ЯМР микротомографа на основе Bruker AVANCE DPX 200. Для получения спектров по ядрам ^1H и томографических изображений образцы распиливались сухим пилением до параллелепипедов нужных размеров (20×20×30 мм). Для исследований взаимодействия с водой образцы помещались вертикально в контейнер с дистиллированной водой с глубиной погружения 3 мм.

Анализ структуры образцов пород и её связи с процессом бурения.

Формулирование задачи исследований

Аналитические исследования образцов горных пород позволили выявить основные причины неустойчивости стенок скважин, сложенных глини-

стыми горными породами (аргиллитами, хлоритами). Наличие тектонических нарушений в рудных зонах снижает устойчивость пород вне зависимости от их минерального состава (трещины выполнены хлоритом, относящийся к подклассу листовых (слоистых) силикатов, по активности в физико-химических процессах хлорит схож с иллитом) [2–4].

По результатам микроскопического (оптического и СЭМ) и рентгенофазового анализа для аргиллитов разведочнинской свиты характерно преобладание мусковита (50–77 %), кварца (8–28 %), шамозита и монтмориллонита (1–19 %, определялись совместно), плагиоклаза (0–6,4 %). Ориентировка слоистых силикатов (мусковит, шамозит, монтмориллонит) субпараллельная слоистости, благодаря чему аргиллиты обладают пониженной устойчивостью к сдвиговым деформациям вдоль плоскости их ориентировки. С учётом высокого литостатического давления, связанного с глубиной залегания, это является одной из причин разрушения глинистых горных пород.

Свойства глинистых пород, представленных смешанно-слоистыми соединениями, обусловлены составляющими их структурами. Во всех образцах обнаружена фаза монтмориллонита, которая определяет коллоидно-химическую активность, набухание, способность к повышенной гидратации [5–8]. Способность к набуханию подтверждено дополнительными рентгеновскими исследованиями на нескольких исследуемых образцах. При пропитке их водой или, наоборот, нагревании и испарении воды рефлексы фазы монтмориллонита смещаются относительно рефлексов шамозита, указывая на изменение кристаллической решетки и внедрение/выход молекул воды из решетки кристаллов. По оценкам весовая доля монтмориллонита составляет 3–10 %. Р. Грим [3] показал, что примеси монтмориллонита (~ 5 %) в глинах различного состава обуславливают сильное увеличение верхних пределов пластичности. Беспорядочное чередование этих минералов в глинистой породе чревато осложнениями в скважине.

По типу взаимодействия с водой образцы разделены на группы: водоупорные (проникновение воды внутрь образца не обнаруживается), пропитываемые (происходит проникновение воды внутрь порового пространства, размер пор 0,1–5 мкм), разрушаемые (происходит взаимодействие воды и материала породы). Взаимодействие с водой разрушаемых образцов приводит к появлению третьего состояния присутствующей в образце воды (помимо свободного и связанного), близкого по свойствам к состоянию воды в образцах монтмориллонитовой глины [9].

Для ТРУ характерно отсутствие четкой связи между прочностью аргиллитов и глубиной их залегания. Кавернообразование и геологические осложнения возможны в широком диапазоне глубин от 700 до 2000 м [10]. Аргиллиты отличаются обилием мелких зерел скольжения. По плоско-

стям плитчатости отмечены борозды скольжения с глинками трения. Разрушение аргиллитов при взаимодействии с буровыми растворами на водной основе связано с их минеральным составом.

В работе [5] показано, что растирание приводит к изменению размеров частиц, увеличению поверхности и числа нарушенных связей глинистых и неглинистых минералов и как следствие к увеличению емкости катионного обмена. Аналогичное явление наблюдается при разрушении глинистых горных пород алмазными импрегнированными коронками. При вскрытии глинистых горных пород (аргиллит, хлорит) горизонтальные напряжения на стенке скважины снимаются и обезвоженные глинистые породы начинают адсорбировать воду из бурового раствора [11]. При бурении глинистых горных пород на ТРУ с применением полимер-солевых растворов происходит разрушение стенок скважины посредством осыпания твердых обломков, в результате чего диаметр ствола увеличивается, а тяжелая фракция оседает на дно скважины. Вода проникает в микропоры и микротрещины, способствуя раскрытию трещин, гидратации глинистых минералов с образованием площадок скольжения и как следствие приводит к обрушению стенок скважин.

На основании лабораторных исследований образцов глинистых горных пород ТРУ авторы пришли к выводу, что наиболее часто встречается гидрослюда, хлорит и в небольших количествах монтмориллонит (3–10 %). Поэтому для лабораторных исследований были выбраны мономинеральные глины двух минералогических типов: монтмориллонитовые Таганского месторождения [12] и иллитовые фирмы Бароид (API Standart Evaluation Base Clay). Вопросу изучения гидратации глинистых минералов посвящено очень много исследований, тем не менее в области исследования взаимодействия глинистых горных пород с буровыми растворами различных составов этот вопрос остается недостаточно изученным.

Краткий очерк развития представлений о структуре жидкой воды и о связанной воде глин, а также структурные модели воды представлены в работах [5, 13–15]. В настоящей работе остановимся на теоретических и экспериментальных исследованиях О.Я. Самойлова, которые были положены в основу исследований по гидратации монтмориллонитовой и иллитовой глин в различных растворах. В соответствии с представлениями, развитыми в классических работах О.Я. Самойлова [16], гидратацию ионов в растворах в общем случае необходимо рассматривать как действие ионов на трансляционное движение (активированные скачки) ближайших молекул воды в растворе. Следует рассматривать трансляционное движение молекул воды относительно иона в непосредственной его близости – обмен ближайших к иону молекул воды раствора. Если этот обмен ослаблен (происходит сравнительно редко), то гидратация иона значительна. По мере того как частота обмена увеличи-

вается, гидратация иона ослабляется. Если в растворе по соседству молекулы воды оказывается ион, то энергия активации скачков молекулы воды из одного положения равновесия в соседнее становится вместо E равной $E + \Delta E$. Величина ΔE и является количественной характеристикой гидратации. Чем больше величина ΔE , тем реже происходит обмен молекул воды, составляющих в растворе ближайшее окружение иона, и тем больше гидратация. Для некоторых ионов $\Delta E < 0$; обмен молекул воды вокруг этих ионов происходит чаще, чем такой обмен происходит вокруг молекулы воды в воде. Молекулы воды около ионов, для которых $\Delta E < 0$, становятся более подвижными, чем в чистой воде. Это явление было названо *отрицательной гидратацией*.

Описанные представления о структуре воды и водных растворов электролитов, а также новый подход к изучению гидратации ионов в водных растворах (представление об отрицательной гидратации) были, в сущности, использованы Д.С. Соколовым [17] при выяснении механизма таких физико-химических процессов, как выщелачивание и гидратация глинистых пород. Для сравнительной характеристики гидратации предложено использовать значение плотности расположения молекул воды в ближайшем окружении иона, не забывая, что в окружении иона происходит постоянная смена молекул воды. Эта плотность ρ' вычисляется по формуле

$$\rho' = \frac{n}{4\pi(r+1,38)^2} \text{ \AA}^{-2},$$

где n – координационное число иона; r – радиус иона в \AA ; 1,38 – радиус молекулы в \AA и, соответственно, $4\pi(r+1,38)^2$ – поверхность первой координационной сферы в \AA^{-2} . Другим показателем гидратации является величина $\tau/\tau_{н,0}$, т. е. отношение среднего времени пребывания молекул воды в положении равновесия в ближайшем к иону окружении к среднему времени пребывания молекул воды в положении равновесия в чистой воде. Значения этих показателей, определенных О.Я. Самойловым для одноатомных ионов, сведены в табл. 1, где ионы расположены в порядке убывания присущей им величины ρ' . Рассмотрение этой таблицы показывает, что к ионам, ослабляющим трансляционное движение молекул воды, находящихся в ближайшем окружении иона, относятся почти все катионы, а к ионам, усиливающим это движение, – однозарядные ионы с большим радиусом, т. е. анионы Cl^- , Br^- и J^- , а из катионов – K^+ (табл. 1, а также цезий и рубидий, которые в таблицу не включены). Гораздо сложнее установить значения ρ' для многоатомных ионов SO_4 , NO_3 , HCO_3 , и CO_3 , которые в то же время распространены в природных водах не менее широко, чем одноатомные ионы, приведенные в табл. 1. Однако вряд ли можно сомневаться, что сущность явлений при появлении в растворах комплексных ионов остается той же, т. е. они тоже влияют на трансляционное дви-

жение молекул воды. Но при этом оказывается, что если ионы SO_4 и NO_3 должны быть отнесены к категории ионов, характеризующихся отрицательной гидратацией, т. е. усиливающих трансляционное движение ближайших молекул воды, то ионы HCO_3 и CO_3 обладают противоположными свойствами. На наличие отрицательной гидратаций у ионов SO_4 и NO_3 косвенно указывают результаты более ранних экспериментальных исследований Н.К. Воскресенской и К.С. Пономаревой. Эти исследования показали, что по относительному увеличению экзотермичности растворения ионы располагаются следующим образом:

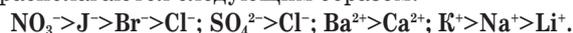


Таблица 1. Сравнительная характеристика воздействия ионов на трансляционное движение молекул в растворах при температуре 25 °С (по О.Я. Самойлову)

Table 1. Comparative analysis of ions action on molecule translational motion in solutions at 25 °C (by O.Ya. Samoylov)

Ионы Ions	r , Å	Координационное число Coordinate number	ρ' , Å ⁻²	$\tau/\tau_{\text{H}_2\text{O}}$	Примечание/Note
Li	0,78	3,8	0,065	3,0	Ионы гидратирующиеся (ослабляют трансляционное движение молекул воды) Hydrating ions (weaken the translational motion of water molecules)
Mg ²⁺	0,78	3,8	0,065	–	
Ca ²⁺	1,06	4,0	0,054	–	
Na ⁺	0,98	3,7	0,053	1,8	
Sr ²⁺	1,27	4,4	0,050	–	
Ba ²⁺	1,43	4,8	0,048	–	
H ₂ O	1,38	4,6	0,044	1	–
K ⁺	1,33	3,8	0,042	0,89	Ионы с отрицательной гидратацией Ions with negative hydration
Cl ⁻	1,81	4,4	0,035	0,65	
Br ⁻	1,96	4,8	0,034	0,59	
J ⁻	2,2	5,3	0,033	0,53	

Примечание: ρ' в Å⁻² – поверхностная плотность молекул воды в первом координационном слое.

Note: ρ' в Å⁻² is the water molecule area density in the first coordinative layer.

Повышение активационного барьера самодиффузии влечет за собой изменение макроскопических свойств жидкости. В присутствии положительно гидратированных ионов уменьшается коэффициент самодиффузии воды и ее термодинамическая активность. Основные положения рассмотренной концепции были сформулированы Самойловым для разбавленных растворов электролитов, в которых сохраняется, хотя и искаженная, структура воды. В концентрированных растворах электролитов эта теория не совсем применима, поскольку для них характерна, в смысле ближней упорядоченности, структура соответствующих кристаллогидратов. Однако те положения теории, которые касаются разделения ионов на положительно и отрицательно гидратируемые, остаются в силе и для концентрированных растворов [18].

Не меньший интерес представляет вопрос о характере воздействия на структуру воды избыточного протона, т. е. свободного водородного иона,

чему посвящены две специальные работы О.Я. Самойлова. Этот ион имеет особую природу, так как в водных растворах избыточные протоны располагаются внутри электронных орбит молекул воды и не закреплены за определенными молекулами воды с образованием устойчивых ионов H_3O^+ , а постоянно перемещаются от одной молекулы к другой. При этом движение избыточных протонов имеет скачкообразный характер. Избыточные протоны сообщают молекулам воды некоторый небольшой положительный заряд. Существование этого заряда приводит к тому, что в растворе кислоты (наличие избыточных протонов) молекулы воды, гидратирующие катионы растворяемых солей, получают от них дополнительное отталкивание. Вместе с тем молекулы воды в растворе кислоты получают некоторое дополнительное притяжение к анионам растворяемых солей. Однако в силу большего радиуса анионов взаимодействие с катионом, т. е. отталкивание, превалирует. Тем самым избыточные протоны не только сами очень быстро (скачкообразно) перемещаются от одной молекулы к другой, но, по-видимому, их присутствие усиливает трансляционное движение самих молекул воды. Важно ещё раз подчеркнуть, что различные ионы оказывают различное влияние на интенсивность теплового трансляционного движения молекул раствора, разделяясь на две крупные категории: 1) ионы, ослабляющие это движение, – большинство катионов, и анионы HCO_3^- и CO_3^{2-} ; 2) ионы, усиливающие движение, – большинство анионов, избыточный протон и некоторые катионы. При этом ионы, входящие в каждую из этих категорий и даже обладающие одной и той же величиной заряда, являются неодинаковыми в отношении степени их воздействия на трансляционное движение молекул воды раствора.

Анализ вышеизложенного материала позволяет предположить, что растворяющая способность воды и водных растворов электролитов существенным образом связана с трансляционным движением молекул воды и ионов, входящих в структуру водного раствора. При этом необходимо сразу же отметить, что указанная связь более отчетливо выступает тогда, когда процесс растворения не сопровождается образованием в растворе новых комплексных ионов. В водных растворах большинства нейтральных солей – серной, азотной и галоидных кислот – присутствуют ионы, оказывающие различное действие на трансляционное движение молекул воды. Одни из них (катионы) ослабляют это движение, другие (анионы), наоборот, усиливают его. При этом в силу больших значений координационных чисел у анионов усиление трансляционного движения будет превалировать над противоположным действием большинства катионов. По этой причине растворяющая способность водных растворов солей больше, чем у чистой воды. Так как степень действия различных ионов на трансляционное движение молекул воды неодинакова, то и влияние тех или иных солей на раство-

ряющую способность вод различно. Отметим, что соответствие растворяющей способности растворов различных солей по порядку расположения ионов, по степени и характеру их влияния на структуру воды может нарушаться также за счет других явлений. Например, при гидролизе солей сильных кислот и слабых оснований за счет появления в растворе свободных протонов будет происходить дополнительное усиление трансляционного движения молекул воды. Снижение растворяющей способности концентрированных растворов обычно происходит постепенно, и она ещё длительное время остается более высокой по сравнению с растворяющей способностью чистой воды. В концентрированных растворах солей трансляционное движение молекул воды остается более интенсивным по сравнению с чистой водой, но в то же время по мере роста концентрации катионов и анионов оно все более и более подавляется их взаимодействием между собой [19].

Целью данной работы является исследование влияния водных растворов простых солей и электролитов на гидратацию глинистых минералов при бурении скважин комплексами КССК на ТРУ.

Проведение исследований

Для проведения лабораторных работ по исследованию гидратации глинистых горных пород изготавливали таблетки из монтмориллонитовой глины Таганского месторождения (ММГ) и иллитового глинопорошка, предоставленного фирмой Бароид (США). Таблетки прессовали на компакторе OFITE при различном давлении (10,34; 20,68; 31,03; 41,37 МПа) в течение 30 минут, что позволяло получать таблетки с различной проницаемостью (табл. 2).

Таблица 2. Проницаемость глинистых таблеток, спрессованных на компакторе OFITE

Table 2. Permeability of clay tablets, pressed on compactor OFITE

Тип глины Clay type	Проницаемость (мД) глинистых таблеток, спрессованных под разным давлением (МПа) Permeability (mD) of clay tablets, pressed under different pressure (MPa)			
	10,34	20,68	31,03	41,37
Монтмориллонит Montmorillonite	26,40	2,080	0,087	0,066
Иллит Illite	0,360	0,199	0,127	0,112

Исследования проводили на тестере продольного набухания фирмы OFITE. Таблетки закладывали в испытательные ячейки и заливали раствором. Программное обеспечение позволяет исследовать процесс гидратации в автоматическом режиме в течение длительного времени. На рис. 1–5 представлены графические зависимости изменения линейных размеров исследуемых образцов в дистиллированной воде, растворах простых солей высо-

кой концентрации и в полиэлектролитных растворах.

Выводы

Экспериментальный материал позволил сделать следующие выводы:

1. Независимо от типа раствора пористость и проницаемость оказывает влияние на изменение линейных размеров глинистых образцов, что подтверждается графиками исследуемых образцов, изготовленных при разных давлениях. Так, образцы, спрессованные при давлении 10,34 МПа в дистиллированной воде, разрушались и частично осыпались на дно испытательной ячейки, поэтому наблюдалась заниженная величина прочности.
2. Скорость гидратации образцов в растворах простых солей выше, чем в дистиллированной воде, что хорошо согласуется с [20, 21]. Электролиты, разрушая структуру воды, возникающую вблизи гидрофильных поверхностей, понижают ее вязкость в граничном слое.
3. Более высокая скорость гидратации наблюдалась в растворах хлористого калия, что вполне согласуется с теорией О.Я. Самойлова. Трансляционное движение молекул воды за счет наличия иона K^+ , обладающего отрицательной гидратацией, приводит к увеличению скорости проникновения молекул воды в поровое пространство, а затем в межплоскостное пространство монтмориллонита. Наблюдается отчетливо три этапа: 1) кристаллическое набухание ММГ до увеличения межбазисного расстояния d_{001} до 15,87 Å; 2) осмотическое набухание; 3) стабилизация процесса и прекращение гидратации за счет встраивания иона калия в кислородном листе.
4. В концентрированных растворах простых солей трансляционное движение молекул воды остается более интенсивным по сравнению с чистой водой, что приводит к дестабилизации глинистого образца на первой стадии и стабилизации на второй за счет обменных реакций, что достаточно хорошо согласуется с представлениями Д.С. Соколова [17] о растворяющей способности насыщенных растворов.
5. Скорость гидратации глинистых минералов замедляется в растворах, содержащих гидратирующие катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+}), но это не приводит в конечном итоге к стабилизации глины, т. к. гидратная оболочка препятствует взаимодействию катиона и глинистого минерала. Стабилизация наступает за более длительный период, чем в случае с ионом калия. Наблюдается два механизма: обменные реакции с катионами глины и, как следствие, переход натриевой формы в кальциевую; и второй – при применении хлористого натрия, – уменьшение размеров двойного электрического слоя и, как следствие, стабилизация изменения линейных размеров образца [22].

6. Гидратация образцов, спрессованных из иллитового порошка в дистиллированной воде и различных растворах, показала, что наблюдается микроагрегатное набухание, адсорбция воды происходит только на внешних поверхностях микроагрегатов. Это объясняется строением кристаллической решетки иллита.
7. Гидратация иллита в среде растворов, содержащих гидратируемые и негидратируемые катионы, подтвердила постулат о трансляционном движении молекул воды.
8. Гидратация ММГ в среде раствора, содержащего крупный поликатион ($pH=3,9$), подтвердила положение о повышении трансляционного движения молекул воды за счет свободного иона H^+ . Величина набухания превышает аналогичные величины в среде простых солей и в дистиллированной воде.
9. Анализ представленного экспериментального материала, подтвердил положение о том, что все анионы интенсифицируют процесс трансляционного движения молекул воды и тем самым ускоряют процесс взаимодействия молекул воды с глинистыми минералами.
10. Теория О.Я. Самойлова о гидратации ионов и трансляционном движении молекул воды объясняет парадоксальный факт более высокой скорости и большего увеличения линейных размеров образцов глин, а в растворах анионных и катионных полимеров с большой молекулярной массой. Полианионы и поликатионы способствуют более быстрому проникновению молекул воды в поровое пространство и далее в межплоскостное пространство глинистых минералов, что приводит практически к неограниченному набуханию.
11. Увеличение плотности раствора за счет насыщения солями не приводит к замедлению скорости гидратации, а наоборот приводит к росту скорости поглощения молекул воды. Ранее [23, 24] экспериментально доказано, что при увеличении концентрации электролита эффективные коэффициенты диффузии растворенных веществ резко возрастают. Это было особенно заметно, когда радиус пор в исследованных силикагелях был менее 30 \AA . Почти все монтмориллонитовые глины имеют в основном радиусы пор $10\text{--}25 \text{ \AA}$, а адсорбенты смешанной структуры имеют поры размерами $20\text{--}70 \text{ \AA}$. Такой факт подтвердил выводы Б.В. Дерягина [25] о том, что электролиты разрушают структуру воды в граничном слое.
12. Глинистые образцы, погруженные в солевые растворы, в т. ч. соленасыщенные ($NaCl$, KCl , KNO_3 , $CaCl_2$, $MgCl_2$), распадаются на отдельные микроагрегаты в течение первых минут (1–40), за счет агрегирования глинистых пластинок и, соответственно, увеличения размера пор и проницаемости. При погружении аналогичных образцов в полиэлектролитные растворы наблюдается неограниченное набухание. Это объяс-

няет явление, которое протекает при перебурировании глинистых горных пород, например, агиллитов.

Заключение

Наблюдения за процессом бурения скважин на ТРУ подтверждают вышеизложенное. По мнению Ф.Д. Овчаренко [23], вода на гидрофильных твердых поверхностях проявляет себя как поверхностно-активное вещество – сильно понижает прочность в результате адсорбции. Интенсивность осмотических потоков, таким образом, в значительной степени зависит от состава и концентрации компонентов бурового раствора. На возможное влияние осмоса, как на одну из причин обвала пород, ранее указывал В.Ф. Роджерс [26].

Наши результаты изучения действия концентрированных растворов простых солей в интервале 1–25 % на набухаемость ММГ показали малое влияние степени минерализации раствора. В случае применения более высоких концентраций, согласно теории осмотических процессов, должна соблюдаться закономерность: чем выше концентрация электролита, тем выше осмотическое давление раствора, тем дольше должен быть период устойчивости породы, контактирующей с раствором. Установлено, однако, что при дальнейшем повышении концентрации раствора не только не наблюдается снижения скорости гидратации глин, но, наоборот, разрушение породы ускоряется.

При перебурировании рудных зон происходит разрушение хлоритов алмазными резами, что можно отнести к процессу аналогичному перемалыванию глинистых минералов при механической активации в мельнице. Искусственное диспергирование глинистых минералов приводит к повышению емкости обмена, что убедительно доказано В.С. Шаровым. Это в конечном итоге способствует гидратации хлоритов и как следствие снижению прочности и разрушению.

Л.И. Кульчицкий в своей работе [5] показал, что при растирании гидрослюдистых глин более 30 минут начинает резко возрастать процесс разламывания кристаллов в направлении, перпендикулярном плоскости их базисов, и, следовательно, начинает заметно увеличиваться число адсорбционных центров по местам сколов кристаллов. При этом центры адсорбции относительно катионов на поверхности углов, ребер и сколов кристаллов глинистых минералов составляют лишь небольшую часть от общего количества центров адсорбции. Эта меньшая часть активных центров поверхности глинистых минералов обладает заметно большей энергией адсорбции относительно катионов, чем преобладающая часть активных центров базальных граней кристаллов. С увеличением времени помола число наиболее активных центров адсорбции глинистых минералов увеличивается.

Первой попыткой предупредить гидратацию было использование силикатных буровых растворов, которые состояли из силиката натрия и насыщенно-

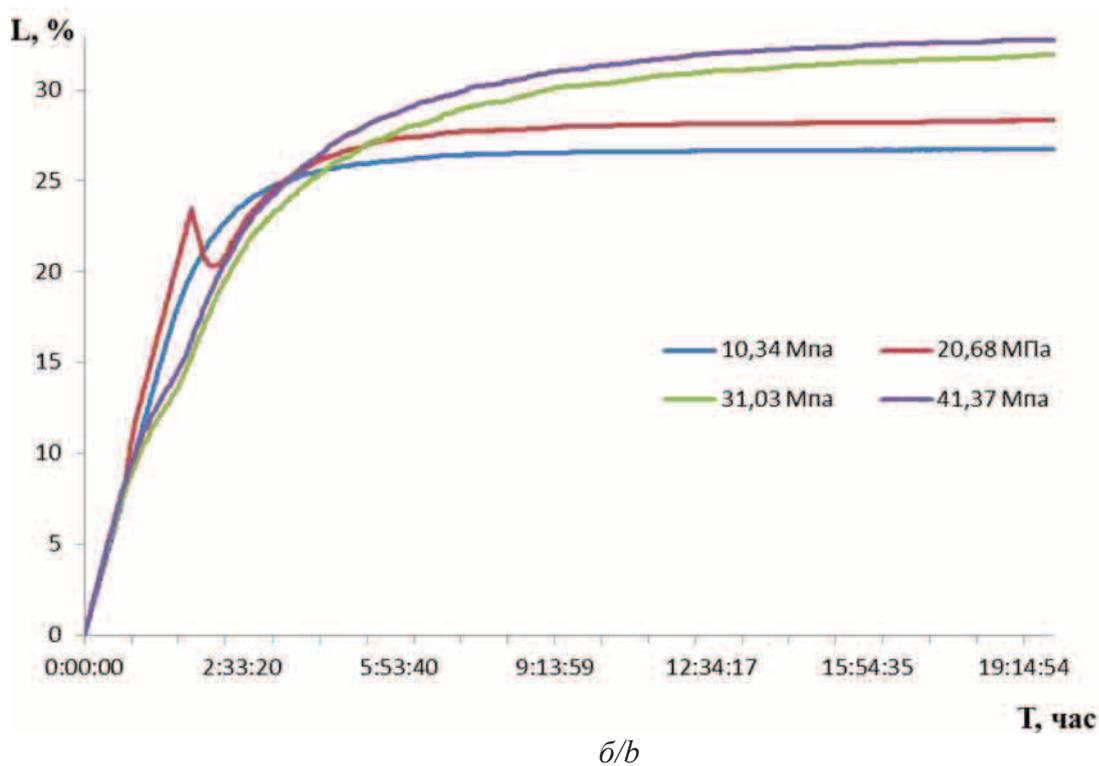
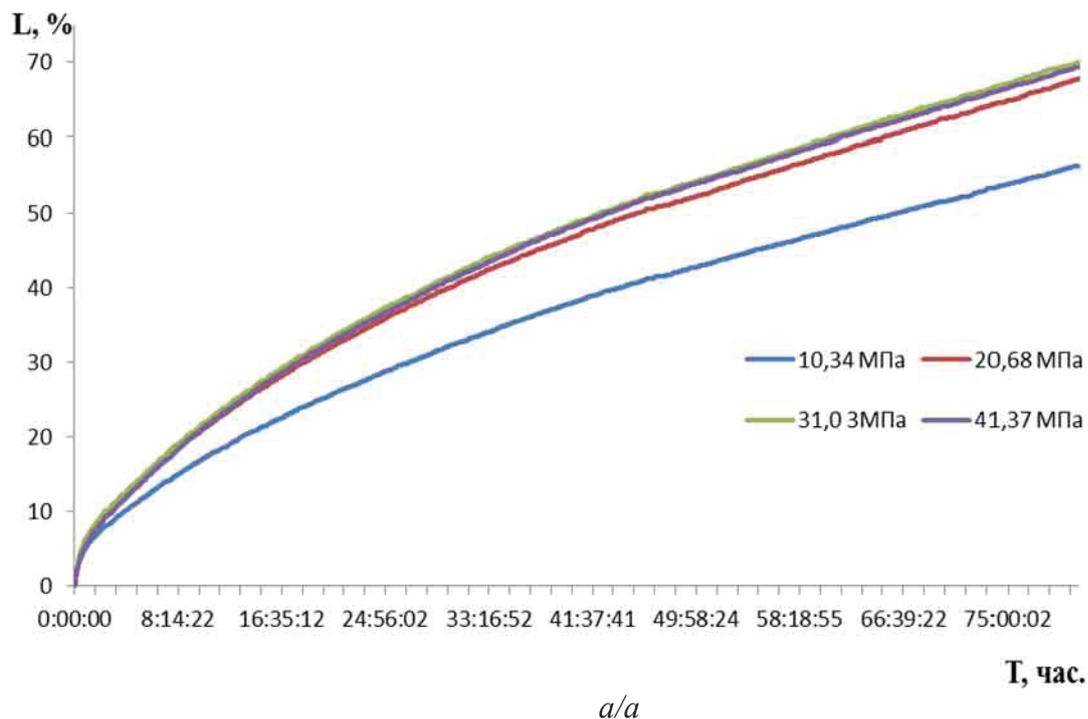
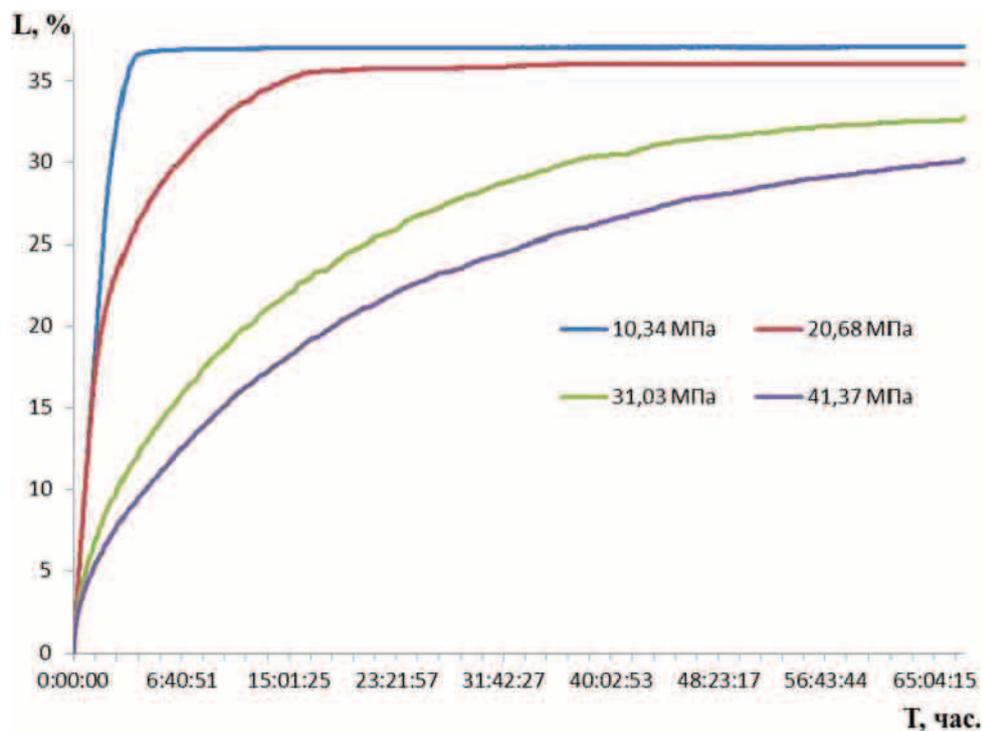
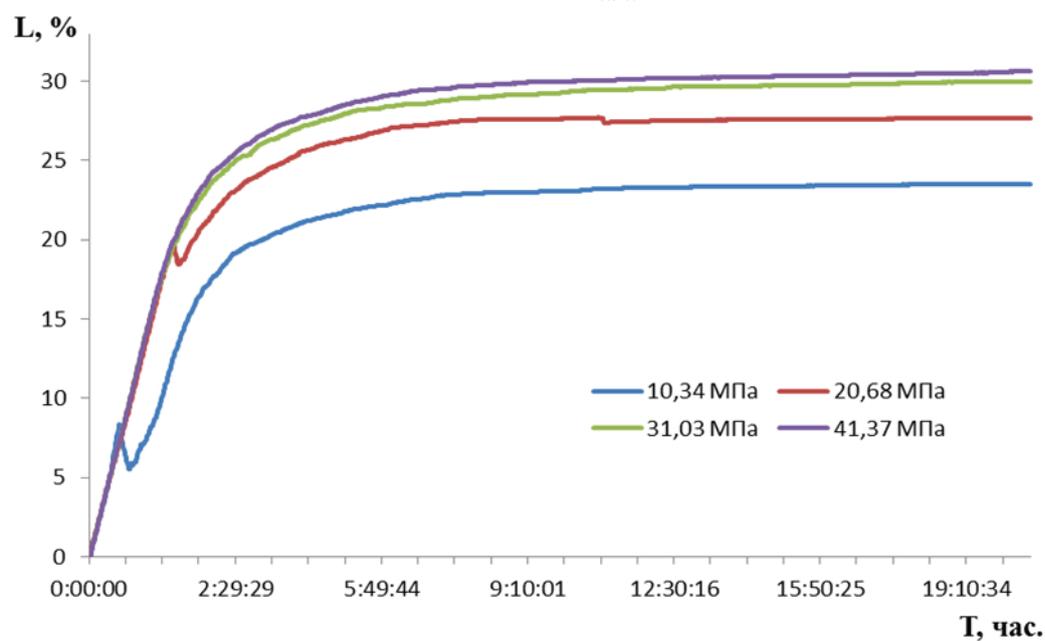


Рис. 1. Типичная кривая степени набухания таблеток, спрессованных из ММГ (а) и иллитового глинопорошка (б) при различном давлении в дистиллированной воде

Fig. 1. Representative curve of swelling ratio of tablets pressed from montmorillonite clay deposit (MCD) (a) and illite mud powder (b) at different pressure in distilled water



a/a



b/b

Рис. 2. Типичная кривая степени набухания таблеток, спрессованных из ММГ (а) и иллитового глинопорошка (б) при различном давлении в 26 % растворе хлористого натрия

Fig. 2. Representative curve of swelling ratio of tablets pressed form MCD (a) and illite mud powder (b) at different pressure in 26 % sodium chloride solution

го раствора хлорида натрия. Эти растворы оказались настолько эффективными в отношении регулирования гидратации и диспергирования, что при разбурировании вязких глин на поверхности получали шлам с

еще видными следами зубьев долота. К сожалению, поддерживать необходимые реологические свойства силикатных буровых растворов было настолько трудно, что применения эти растворы не нашли [11].

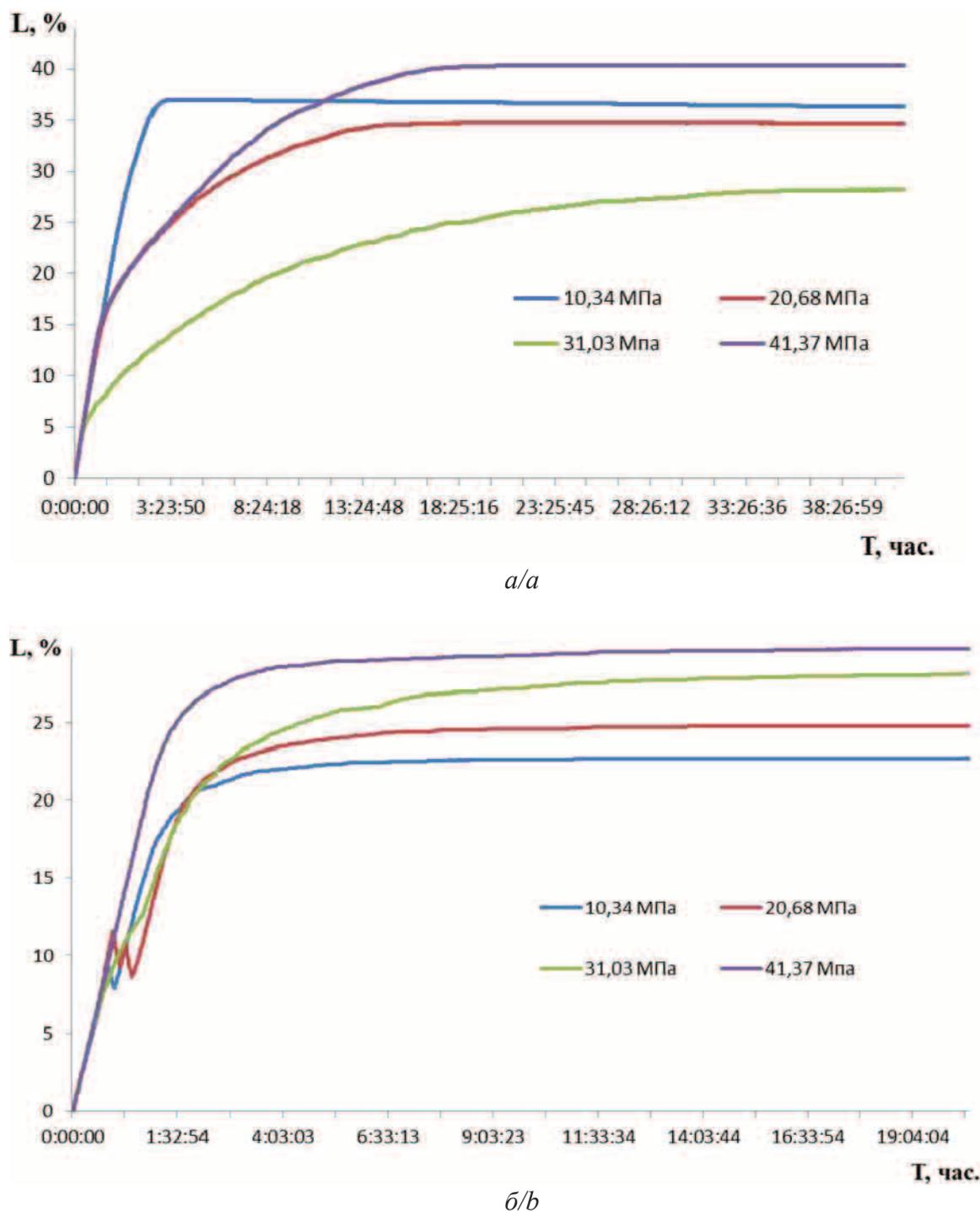
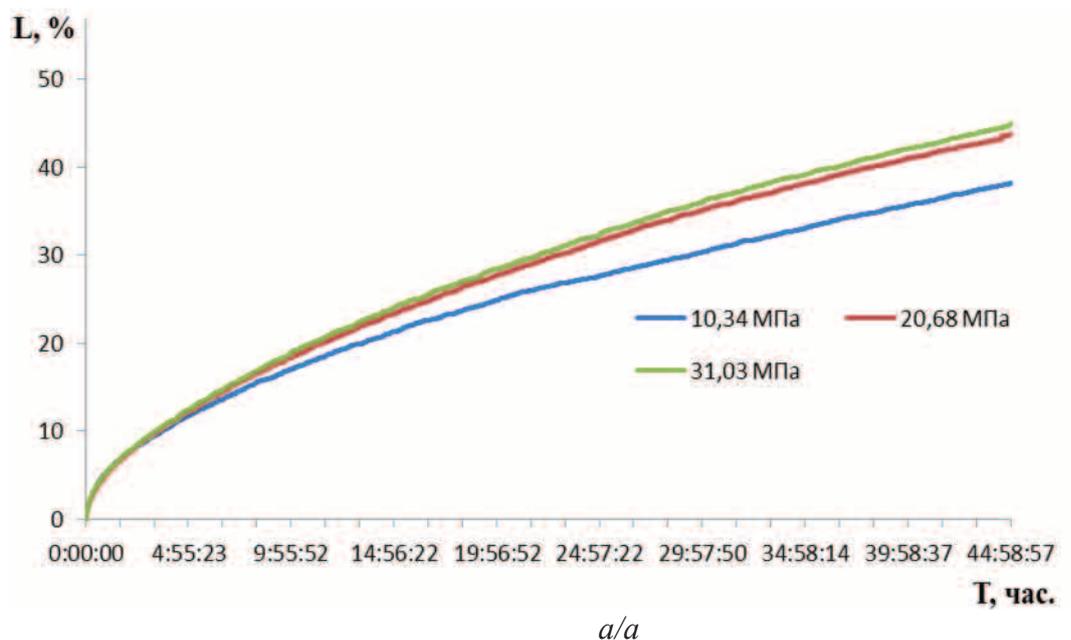


Рис. 3. Типичная кривая степени набухания таблеток, спрессованных из ММГ (а) и иллитового глинопорошка (б) при различном давлении в 25 % растворе хлористого калия

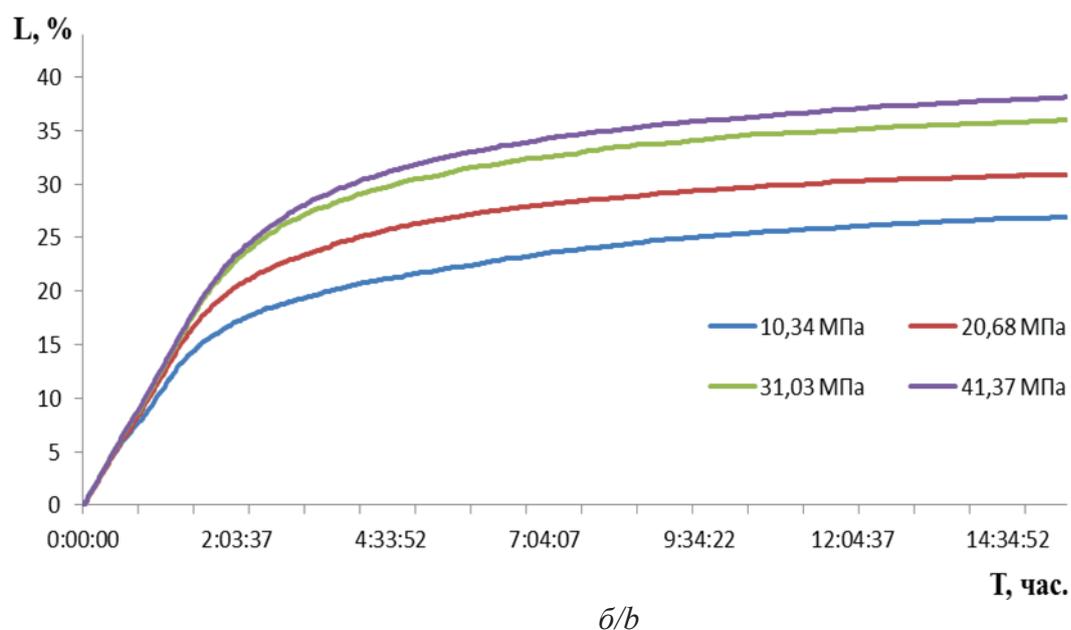
Fig. 3. Representative curve of swelling ratio of tablets pressed form MCD (a) and illite mud powder (b) at different pressure in 25 % potassium chloride solution

Практика показала, что силикатные буровые растворы эффективно повышают устойчивость стенок скважин, предотвращают обвалы и осыпи, в некоторой степени защищают забойные бурильные инструменты и обсадные колонны от коррозии. Жидкие стекла являются эффективными де-

флокулянтами, иначе говоря, в водных дисперсных системах они способны пептизировать крупные механические агломераты в мелкие частицы и таким образом снижать вязкость некоторых суспензий. В качестве дефлокулянтов растворы силикатов натрия или калия широко используются



a/a



б/б

Рис. 4. Типичная кривая степени набухания таблеток, спрессованных из ММГ (а) и иллитового глинопорошка (б) при различном давлении в 0,2 % растворе анионного полимера EZ-MUD DP (BAROID)

Fig. 4. Representative curve of swelling ratio of tablets pressed form MCD (a) and illite mud powder (b) at different pressure in 0,2 % solution of anionic polymer EZ-MUD DP (BAROID)

при бурении нефтеносных и газовых скважин в составе буровых растворов. И в зарубежной, и в отечественной нефтегазодобывающей отрасли разработан целый спектр эффективных и экологически безопасных буровых растворов на основе жидкого стекла [27]. В водных растворах поликонденсация силикатных ионов приводит к формированию частиц SiO_2 нанодисперсных размеров; в кислой среде такие первично сформированные частицы объединяются в разветвленные це-

почки, которые образуют сетку геля, пронизывающую водную фазу по всему объему. В слабощелочной среде и в присутствии электролитов частицы SiO_2 объединяются в слабосвязанные между собой агрегаты, образуя рыхлые осадки. Наиболее широкое распространение в промышленности имеют жидкие стекла – растворы силикатов натрия и калия, силикатный модуль которых находится в пределах 2,5–4 при плотности растворов от 1,3 до 1,45 г/см³ [28, 29].

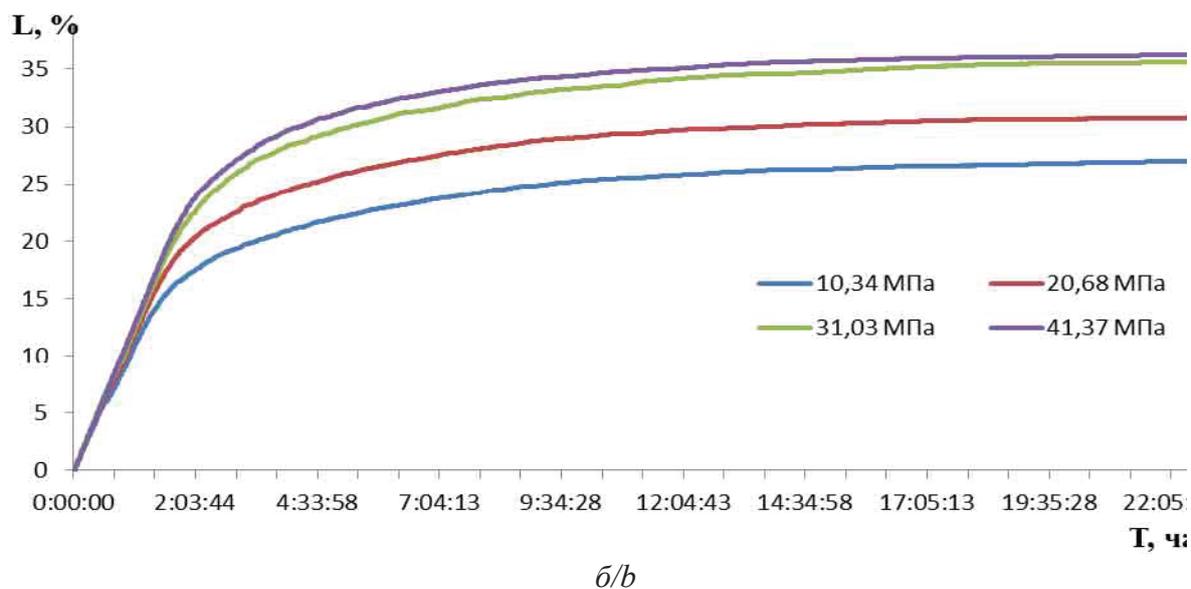
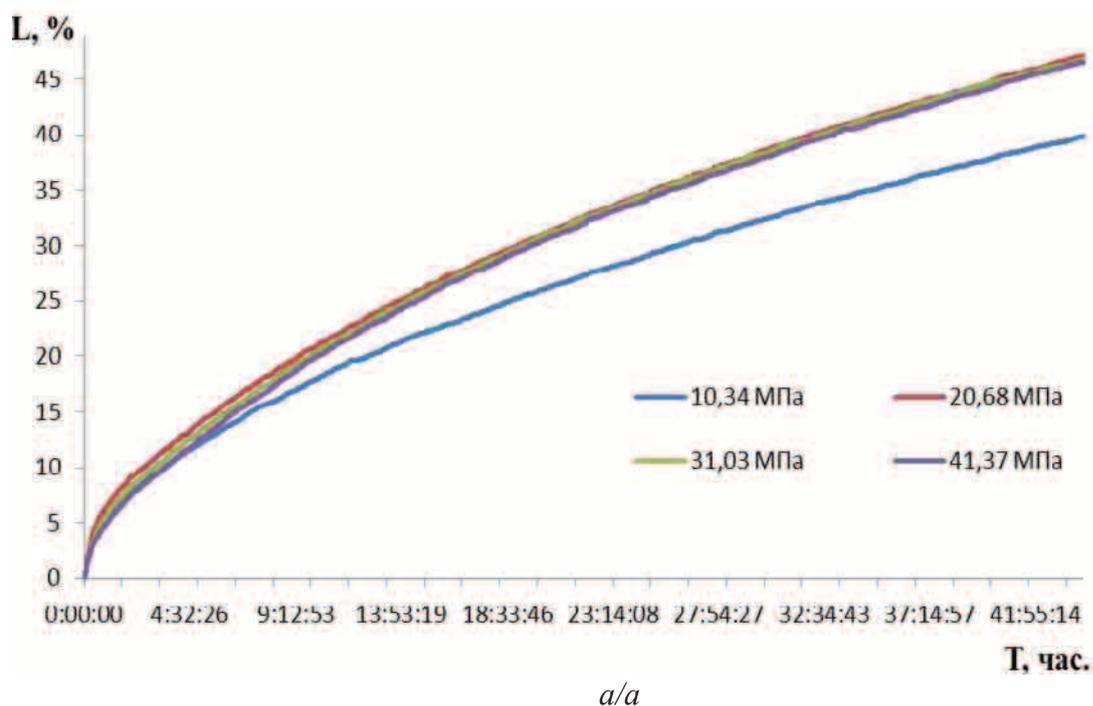


Рис. 5. Типичная кривая степени набухания таблеток, спрессованных из ММГ (а) и иллитового глинопорошка (б) при различном давлении в 0,2 % растворе катионного полимера К-6729 (Besfloc)

Fig. 5. Representative curve of swelling ratio of tablets pressed form MCD (a) and illite mud powder (b) at different pressure in 0,2 % solution of canionic polymer K-6729 (Besfloc)

Анализ изложенного материала показывает, что для стабилизации стенок скважин, сложенных глинистыми минералами, необходимо продолжить лабораторные исследования, направленные

на разработку силикатных растворов без добавок солей, что позволит получать на контакте нерастворимый силикат кальция или магния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Опарин В.Н. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 278 с.
- Грим Р.Е. Минералогия глин. – М.: Недра, 1959. – 454 с.
- Грим Р.Е. Минералогия и практическое использование глин. – М.: Мир, 1967. – 512 с.
- Котельников Д.Д., Конюхов А.И. Глинистые минералы осадочных пород. – М.: Недра, 1986. – 247 с.
- Кульчицкий Л.И. Роль воды в формировании свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1975. – 212 с.
- Осипов В.И. Нанопленки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 4. – С. 291–305.
- Осипов В.И. Внутрикристаллическое разбухание глинистых минералов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 5. – С. 387–398.
- Гизатуллин Б.И., Архипов Р.В., Сулейманова Е.А. Исследование гидратации бентонитовых глин методом ядерного магнитного резонанса // Георесурсы. – 2011. – № 6 (42). – С. 35–39.
- Термохимическое изучение природного монтмориллонита / Л.П. Огородова, И.А. Киселева, Л.В. Мельчакова, М.Ф. Вигасина, В.В. Крупская // Геохимия. – 2013. – № 6. – С. 541–551.
- Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в осложненных условиях. – М.: Недра, 1987. – 269 с.
- Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
- Сапаргалиев Е.М. Формирование, закономерности размещения и разработка новых технологий использования бентонитовых глин Восточного Казахстана: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Усть-Каменогорск, 2010. – 50 с.
- Крестов Г.А. Термодинамика процессов в растворах. – Л.: Химия, 1984. – 272 с.
- Королев В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // Соровский образовательный журнал. – 1996. – № 9. – С. 79–85.
- Саркисов Г.Н. Структурные модели воды // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176. – № 8. – С. 833–845.
- Самойлов О.Я. Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 182 с.
- Соколов Д.С. О связях между растворяющей способностью и структурой водных растворов. – М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1957. – 267 с.
- Влияние водных растворов электролитов на механические свойства гидрофильных материалов / В.Ю. Траскин, З.Н. Скворцова, А.В. Перцов, И.М. Охалкин, Б.Ш. Кенжеев // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2008. – Т. 6. – № 2. – С. 353–365.
- Дамаскин Б.Б. Электрохимия. 2-е изд., испр. и перераб. – М.: Химия, 2006. – 672 с.
- Новиков В.С. Устойчивость глинистых пород при бурении скважин. – М.: Недра, 2000. – 269 с.
- Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы / под ред. акад. Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1985. – 288 с.
- Попов В.Г., Абдрахманов Р.Ф. Ионообменная концепция в генетической гидрогеохимии. – Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2013. – 356 с.
- Овчаренко Ф.Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – 276 с.
- Тарасевич Ю.И., Овчаренко Ф.Д. Адсорбция на глинистых минералах. – Киев: Наукова думка, 1975. – 351 с.
- Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.
- Роджерс В.Ф. Состав и свойства промывочных жидкостей для бурения нефтяных скважин / пер. с англ., 3-е изд. – М.: Недра, 1967. – 599 с.
- Городнов В.Д. Физико-химические методы предупреждения осложнений в бурении. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 229 с.
- Брыков А.С. Силикатные растворы и их применение. – СПб.: СПб ГТИ (ТУ), 2009. – 54 с.
- Корнеев В.И., Данилов В.В. Жидкое и растворимое стекло. – СПб.: Стройиздат, 1996. – 216 с.

Поступила 29.05.2014 г.

UDC 622.248.3

STUDY OF SALT SOLUTIONS INFLUENCE ON CLAY MINERALS HYDRATION WHEN DRILLING WELLS ON THE EXAMPLE OF TALNAKHSKOE DEPOSITS

Aleksandr L. Neverov,

Cand. Sc., Siberian Federal University, 79, Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: neveroff_man@mail.ru

Vladimir P. Rozhkov,

Dr. Sc., Siberian Federal University, 79, Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Dmitri D. Karataev, Norilskgeologiya, post office box 889, Norilsk, 663330, Russia. E-mail: dd.karataev@norilskgeology.ru

Aleksandr A. Neverov,

M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, 31, Avenue Gazety Kranoyarsky Rabochy, 660014, Russia. E-mail: aaneverov@gmail.com

The relevance of the discussed issue is caused by the need to study and to develop drilling fluids for boring exploratory wells in difficult geological conditions of Talnakhscoe deposits.

The main aim of the research is to study and assess the impact of simple salts and polyelectrolyte solutions on clay minerals hydration when drilling applying complexes with retrievable core receiver on Talnakhscoe deposits.

The methods used in the study: methods of X-ray fluorescence spectrometry, electron microscopy, X-ray, spectroscopic and tomographic analysis to determine the clay mineral composition of rocks; hydration of clay minerals on the tester of longitudinal swelling.

The results. The authors have studied illite and montmorillonite hydration in simple salts solutions, water-soluble polymers and their combinations. Translational movement of water molecules due to the presence of K^+ ion which possesses negative hydration leads to increase in rate of penetration of water molecules into the pore space of clay minerals, regardless of their types. In concentrated solutions of simple salts the translational motion of water molecules is more intense in comparison with pure water, that results in destabilization of rocks containing clay minerals in their composition. Independently of the type of the solution, the porosity and permeability affect the change in linear dimensions of the clay samples, as evidenced by the graphs of the experimental samples made at different pressures. Polyanions and polycations facilitate more rapid penetration of water molecules into the pore space and further in the interlayer space of the clay minerals, which leads to virtually unlimited swelling. The rate of hydration of the clay minerals slows in solutions containing hydratable cations (Ca^{2+} , Mg^{2+}), stabilization occurs over a longer period than in the case of potassium ion.

Key words:

Hydration, clay mineral, translational motion of water molecules, degree of swelling, self-diffusion of water, concentrated solution.

REFERENCES

- Oparin V.N. *Zonalnaya dezintegratsiya gornyykh porod i ustoychivost podzemnykh vyrabotok* [Zonal disintegration of rocks and stability of underground workings]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publishing House, 2008. 278 p.
- Grim R.E. *Mineralogiya glin* [The clay mineralogy]. Moscow, Nedra Publ., 1959. 454 p.
- Grim R.E. *Mineralogiya i prakticheskoe ispolzovanie glin* [Mineralogy and practical use of clay]. Moscow, Mir Publ., 1967. 512 p.
- Kotelnikov D.D., Konyukhov A.I. *Glinistyie mineraly osadochnyykh porod* [Clay minerals of sedimentary rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 247 p.
- Kulchitsky L.I. *Rol vody v formirovanii svoystv glinistykh porod* [The role of water in formation of properties of argillaceous rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 212 p.
- Osipov V.I. Nanoplenki adsorbirovannoy vody v glinah, mekhanizm ikh obrazovaniya i svoystva [Nanofilms of adsorbed water in clays, the mechanism of their formation and properties]. *Environmental Geoscience*, 2011, no. 4, pp. 291–305.
- Osipov V.I. Vnutrikristallicheskie razbukhanie glinistykh mineralov [Intracrystalline swelling of clay minerals]. *Environmental Geoscience*, 2011, no. 5, pp. 387–398.
- Gizatullin B.I., Arkhipov R.V., Suleymanova E.A. Issledovanie gidratatsii bentonitovykh glin metodom yadernogo magnitnogo rezonansa [Study of hydration of bentonite clays by NMR method]. *Georesources*, 2011, no. 6 (42), pp. 35–39.
- Ogorodova L.P., Kiseleva I.A., Melchakova L.V., Vigasina M.F., Krupskaya V.V. Termokhimicheskoe izuchenie prirodnoho montmorillonita [Thermochemical study of natural montmorillonite]. *Geochemistry International*, 2013, no. 6, pp. 541–551.
- Kudryashov B.B., Yakovlev A.M. *Burenie skvazhin v oslozhnennykh usloviyakh* [Well drilling under complicated conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 269 p.
- Grey J.R., Darli G.S.G. *Sostav i svoystva burovykh agentov (promyvochnyykh zhidkostey)* [Composition and properties of drilling agents (drilling fluids)]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
- Sapargaliev E.M. *Formirovanie, zakonmernosti razmeshcheniya i razrabotka novykh tehnology ispolzovaniya bentonitovykh glin Vostochnogo Kazakhstana. Avtoreferat Dokt. Dis.* [Formation, patterns of distribution and development of new technologies of use of bentonite clays in East Kazakhstan. Dr. Diss. Abstract]. Ust-Kamenogorsk, 2010. 50 p.
- Krestov G.A. *Termodinamika protsessov v rastvorakh* [Thermodynamics of processes in solutions]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 272 p.
- Korolev V.A. *Svyazannaya voda v gornyykh porodakh: novye fakty i problemy* [Bound water in rocks: new facts and problems]. *Sovetskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1996, no. 9, pp. 79–85.
- Sarkison G.N. *Strukturnye modeli vody* [Structural models of water]. *Advances in Physical Sciences*, 2006, no. 8, pp. 833–845.

16. Samoilov O.Ya. *Struktura vodnykh rastvorov elektrolitov i gidratsiya ionov* [Structure of aqueous solutions of electrolytes and hydration of ions]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publishing House, 1957. 182 p.
17. Sokolov D.S. *O svyazyakh mezhdu rastvorayayushchey sposobnostyu i strukturoy vodnykh rastvorov* [On the connections between structure and solubility of aqueous solutions]. Moscow, State Publishing House of literature of Construction and Architecture, 1957. 267 p.
18. Traskin V.Yu., Skvortsova Z.N., Pertsov A.V., Okhapkin I.M., Kenzheev B.Sh. Vliyanie vodnykh rastvorov elektrolitov na mekhanicheskie svoystva gidrofilnykh materialov [Influence of aqueous solutions of electrolytes on mechanical properties of the hydrophilic materials]. *Nanosistemy, Nanomaterialy, Nanotekhnologii*, 2008, no. 2, pp. 353–365.
19. Damaskin B.B. *Elektrokimiya* [Electrochemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 2006. 672 p.
20. Novikov V.S. *Ustoychivost glinistykh porod pri burenii skvazhin* [Stability of argillaceous rocks when drilling wells]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 270 p.
21. Sergeeva E.M. *Teoreticheskie osnovy inzhenernoy geologii. Fiziko-khimicheskie osnovy* [Theoretical foundations of engineering geology. Physico-chemical basis]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 288 p.
22. Popov V.G., Abdrakhmanov R.F. *Ionoobmennaya kontseptsiya v geneticheskoy gidrogeokhimi* [Ion-exchange concept in genetic hydrogeochemistry]. Ufa, Gilem Publ., 2013. 356 p.
23. Ovcharenko F.D. *Gidrofilnost glin i glinistykh mineralov* [Hydrophilicity of clays and clay minerals]. Kiev, Ukrainian SSR Academy of Sciences Publishing House, 1961. 275 p.
24. Tarasevich Yu.I., Ovcharenko F.D. *Adsorbtsiya na glinistykh mineralakh* [Adsorption on clay minerals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975. 351 p.
25. Deryagin B.V., Churaev N.V., Muller V.M. *Poverkhnostnye sily* [Surface forces]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 398 p.
26. Rodzhers V.F. *Sostav i svoystva promyvochnykh zhidkostey dlya bureniiya neftyanykh skvazhin* [Composition and properties of drilling fluids for oil drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1967. 599 p.
27. Gorodnov V.D. *Fiziko-khimicheskie metody preduprezhdeniya oslozhneniy v burenii* [Physico-chemical methods of preventing complications in drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 229 p.
28. Brykov A.S. *Silikatnye rastvory i ikh primenenie* [Silicate solutions and their usage]. St. Petersburg, St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University) Publ., 2009. 54 p.
29. Korneev V.I., Danilov V.V. *Zhidkoe i rastvorimoe steklo* [Liquid and water glass]. St. Petersburg, Stroyizdat Publ., 1996. 216 p.

Received: 29 May 2014.

УДК 621.315.592+004.942

МАКРОМОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА

Бабушкин Юрий Владимирович,

канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики
Института кибернетики ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: am@tpu.ru

Филиппов Максим Михайлович,

канд. техн. наук, ведущ. эксперт центра мониторинга и рейтинговых
исследований Управления программ развития ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: nauka@tpu.ru

Суан Хунг Нгуен,

аспирант кафедры прикладной математики Института кибернетики ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: am@tpu.ru

Грибенюков Александр Иванович,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Института мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск,
пр. Академический, д. 10/3. E-mail: loc@imces.ru

Необходимость повышения эффективности функционирования солнечных батарей обусловлена постоянно повышающимися требованиями к солнечной энергетике. Повысить эффективность работы батарей можно с помощью использования более качественных элементов. Работа посвящена решению проблемы по созданию комплекса математических моделей различного уровня сложности для решения научно-технических задач, направленных на повышение качества кремния, выращиваемого методом Бриджмена.

Цель исследования: разработка математической модели, позволяющей в реальном масштабе времени с приемлемой точностью прогнозировать течение процесса выращивания кристалла в варьируемых тепловых условиях.

Методы исследования. Разработанная модель реализована на базе метода элементарных балансов для принятой расчетной схемы в пакете Matlab. Модель позволяет проводить оценку температурного поля установки, исследовать взаимное влияние тепловых процессов в системе «ростовой контейнер – термическая установка», имитировать тепловые процессы на всех этапах процесса выращивания кристалла, исследовать различные алгоритмы управления тепловой мощностью нагревателей.

Результаты. Получены оценки положения изотерм кристаллизации и скорости роста кристалла в условиях вертикального метода Бриджмена с механическим перемещением ростового контейнера. Показано, что изменение температурного поля в контейнере при его перемещении существенно влияет на положение изотермы кристаллизации. При этом скорость роста может достигать области отрицательных значений, при которых происходит подплавление уже выращенного кристалла. Кроме того, фактическое время выращивания кристалла может заметно отличаться от запланированного. Полученные расчетным путем данные следует учитывать при проектировании новых установок и планировании экспериментальных работ по выращиванию кристаллов.

Ключевые слова:

Возобновляемая энергетика, мультикремний, фотоэлектрические преобразователи, моделирование роста кристалла, метод Бриджмена, метод элементарных балансов, температурное поле, многозонная термическая установка.

В настоящее время в общественном сознании крепнет убежденность в том, что энергетика будущего должна базироваться исключительно на солнечной энергии. Солнце – это огромный неиссякаемый безопасный источник энергии, в равной степени всем доступный. Ставка на солнечную энергетику должна рассматриваться не только как беспроигрышный, но и в долгосрочной перспективе как безальтернативный выбор для человечества [1].

Главными ограничениями на пути развития солнечной энергетики являются дефицит кремния на мировом рынке и высокая цена моно- и мультикремния, которые используются в качестве основных материалов при изготовлении фотоэлектрических преобразователей [2].

Для расширения использования солнечных энергосистем требуется организация массового производства и создание оптимальных технологий, которые обеспечили бы получение кремния солнечного качества и существенное снижение его стоимости. Один из возможных вариантов выхода из создавшейся ситуации основан на глубокой очистке металлургического кремния и выращивании из него слитков мультикремния методом Бриджмена [3, 4], который нашел широкое применение для выращивания кристаллов, используемых в приборостроении и конструкционном материаловедении.

Многочисленными экспериментальными [5–8] и теоретическими [9–20] исследованиями установлено, что совершенство кристаллов, выращиваемых

мых методом Бриджмена, непосредственно зависит от термических условий, реализуемых в рабочем объеме ростовой установки. Поэтому необходимо, чтобы установка должным образом выполняла следующие функции [21]:

- создание в рабочем объеме требуемого распределения температуры;
- формирование с заданной точностью оптимального температурного поля в ростовом контейнере (РК) на всех этапах выращивания кристалла, а именно: при затравлении, разрачивании до стационарного диаметра и росте в условиях стационарного диаметра.

Исследование процессов выращивания кристаллов с учетом специфики их протекания в каждом конкретном случае производится как экспериментальными, так и методами математического моделирования. В работах по исследованию процесса выращивания кристаллов с привлечением методов математического моделирования можно выделить два подхода:

- к первому относятся исследования, посвященные изучению процессов роста кристаллов исключительно в РК [8–18];
- ко второму относятся работы, в которых математические модели тепловых процессов включают как модель РК, так и модель термической установки, обеспечивающей в РК температурное поле, необходимое для выращивания кристалла [19, 20, 22, 23].

В первом случае при моделировании фазового перехода рабочего вещества в РК используется математическое описание двухфазной задачи Стефана. При этом предполагается, что внешнее для РК температурное поле создается термической установкой и задается в качестве граничного условия. Использование такого подхода позволяет изучить особенности протекания процессов кристаллизации в РК с учетом конвективных потоков в расплаве рабочего вещества, перераспределения тепловых потоков на границе раздела фаз, формы фронта кристаллизации и его подвижности на качество выращиваемого кристалла. В работах [19, 20, 23] больше внимания уделяется вопросам взаимодействия РК и термической установки, т. е. условиям выращивания кристаллов в конкретных реализациях установок. Ввиду сложности решаемой задачи она разделяется на две: сначала рассчитывается температурное поле установки для определенного положения РК; затем делается его перемещение в новое положение и процесс расчета повторяется. В результате получается набор температурных полей для различных положений РК. По полученным данным делаются предварительные оценки изменения температурного поля и характеристик роста кристалла при перемещении РК.

Отличительной особенностью данной работы от перечисленных выше, является моделирование температурного поля в термически связанной системе «установка – перемещающийся в ней РК», что позволяет исследовать динамику процесса рос-

та кристалла в режиме реального времени с учетом взаимного влияния тепловых процессов в установке и РК и получить расчетные характеристики роста кристалла, более близкие к характеристикам реального процесса. В качестве основных характеристик роста кристалла примем множество оценок $M = \{z_i, z_b, z_{cr}, m_{cr}, l_{cr}, t\}$, где z_i, z_b, z_{cr} – верхнее и нижнее положения рабочего вещества в РК и положение фронта кристаллизации; m_{cr}, l_{cr} – масса и длина выращенного кристалла; t – время.

Поведение множества оценок M во время выращивания кристалла рассмотрим для многозонной термической установки (МТУ) [24]. Установка (рис. 1, а) состоит из 23-х осесимметричных нагревательных модулей различного конструктивного исполнения, соосно установленных друг на друга и разделенных теплоизолирующими прокладками. Для формирования требуемого температурного поля в рабочем объеме, где располагается РК, используются 30 резистивных автономных распределенных нагревательных элементов.

В соответствии с осевой симметрией установки, при составлении расчетной схемы ее вертикальный разрез разделен на 290 ячеек ($N=58$ по высоте и 5 по радиусу) (рис. 1, б). Каждая ячейка обменивается тепловой энергией с соседними. На внешних поверхностях установки (границы $\Gamma_2-\Gamma_4$) происходит конвективный теплообмен с окружающей средой. Обмен тепловой энергией между установкой и атрибутами рабочего пространства (границы Γ_5, Γ_6) осуществляется с помощью теплопроводности и излучения.

Уравнение, описывающее тепловые процессы в каждой ячейке МТУ и РК, имеет вид

$$(c\rho V)_{i,j} \frac{dT_{i,j}}{dt} = \sum_{s=1}^5 Q_s, \quad i = 1 \dots N, \quad j = 1 \dots 5,$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; V – объем ячейки, м³; T – температура, К; t – время, с; Q_{1-4} – составляющие теплового потока, поступающего в рассматриваемую ячейку из соседних ячеек, Вт; Q_5 – тепловая мощность, выделяемая нагревателем, расположенным в соответствующей ячейке МТУ, Вт.

Рассмотрим формулы расчета тепловых потоков для внутренних ячеек $i=2 \dots N-1, j=2 \dots 4$ расчетной схемы МТУ (рис. 2).

Тепловой поток через границу g_1 :

$$Q_1 = 2S\lambda_{i,j} \frac{T_{i,j} - T_{g_1}}{\Delta r_j}.$$

Учитывая, что

$$T_{g_1} = \frac{T_{i,j-1}\lambda_{i,j-1}\Delta r_j + T_{i,j}\lambda_{i,j}\Delta r_{j-1}}{\lambda_{i,j-1}\Delta r_j + \lambda_{i,j}\Delta r_{j-1}},$$

получим

$$Q_1 = \frac{2S\lambda_{i,j}\lambda_{i,j-1}(T_{i,j} - T_{i,j-1})}{\lambda_{i,j-1}\Delta r_j + \lambda_{i,j}\Delta r_{j-1}},$$

где S – площадь боковой поверхности ячейки на границе g_1 , м².

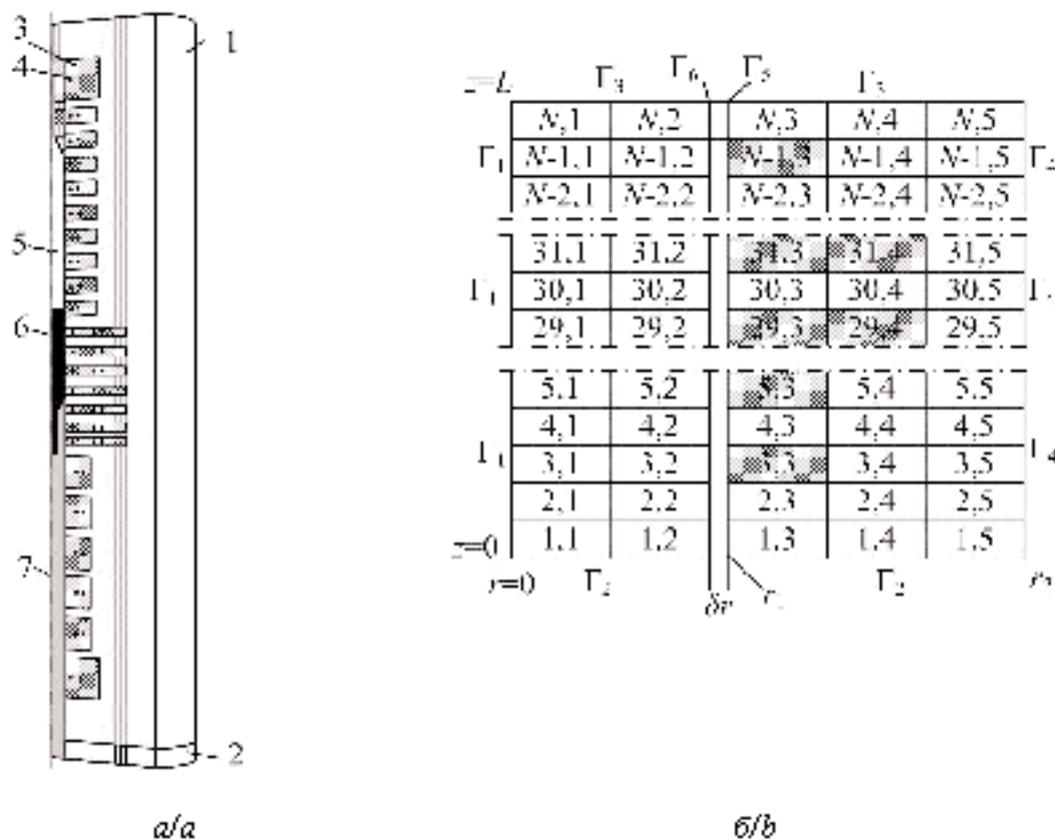


Рис. 1. Фрагмент МТУ с рабочим объемом, заполненным атрибутами, связанными с выращиванием кристаллов (а) и расчетная схема (б, штриховкой выделены ячейки, содержащие нагревательные элементы). Обозначения: 1) теплоизолирующий материал; 2) подставка установки; 3) нагревательные модули; 4) нагреватель; 5) РК (ампула с тиглем, содержащим рабочее вещество); 6) рабочее вещество; 7) подставка РК; Γ_{1-6} – границы; L – высота установки; r_1, r_2 – радиусы рабочего объема и МТУ соответственно; δr – расстояние между РК и поверхностью рабочего объема

Fig. 1. Segment of multizone thermal installation with volumetric displacement filled with attributes related to crystal growing (a) and design model (b, the cells which contain heating elements are hatched). Symbols: 1) heat insulating material; 2) installation platform; 3) heating modules; 4) heater; 5) growth container (ampule with crucible containing working agent); 6) working agent; 7) growth container platform; Γ_{1-6} area the boundaries; L is the installation length; r_1, r_2 are the radii of volumetric displacement and multizone thermal installation correspondingly; δr is the distance between the growth container and the volumetric displacement surface

Аналогично рассчитывается Q_2 .
Тепловой поток через границу g_3 ,

$$Q_3 = S\lambda_{i,j}2 \frac{T_{i,j} - T_{g_3}}{h_i}$$

Учитывая, что

$$T_{g_3} = \frac{T_{i-1,j}\lambda_{i-1,j}h_i + T_{i,j}\lambda_{i,j}h_{i-1}}{\lambda_{i-1,j}h_i + \lambda_{i,j}h_{i-1}}$$

получим

$$Q_3 = \frac{2S\lambda_{i,j}\lambda_{i-1,j}(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\lambda_{i-1,j}h_i + \lambda_{i,j}h_{i-1}}$$

где S – площадь боковой поверхности ячейки на границе g_3 , м².

Аналогично, рассчитывается Q_4 .

Для расчета температур в ячейках, соприкасающихся с внешними поверхностями, используются граничные условия, определяемые конструк-

тивным исполнением нагревательных модулей, свойствами используемых материалов, а также условиями взаимодействия модулей с окружающей средой и между собой, а именно:

- в силу радиальной симметрии (граница Γ_1)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0;$$

- на поверхностях соприкасающихся элементов соблюдаются условия сопряжения в виде равенства тепловых потоков и температур

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_- = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_+, \quad \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_- = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_+, \quad T|_- = T|_+;$$

- на нижней, верхней и боковой поверхностях МТУ (границы $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$) выполняются условия равенства теплового потока от МТУ в окружающую среду и равенство температур на границах

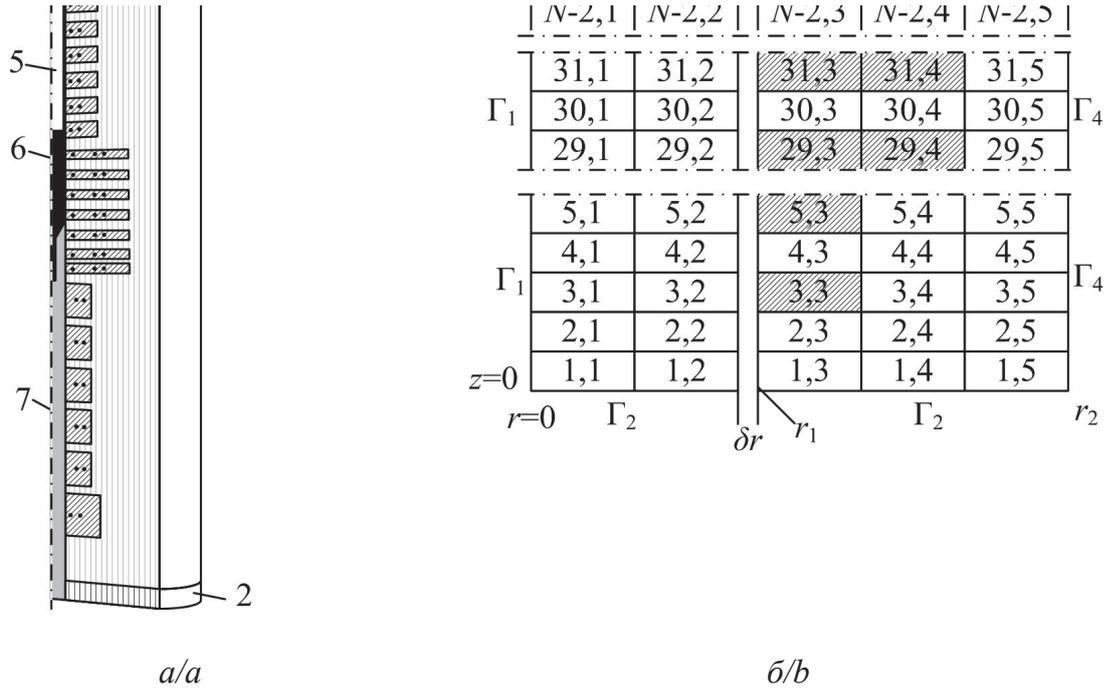


Рис. 2. Составляющие теплового потока, поступающего в ячейку (i, j) (а) и расчетная схема РК (б). Обозначения: g_{1-4} и h_i – границы и высота i -го слоя по вертикальной координате, соответственно; Δr_j – линейный размер (i, j) -й ячейки в радиальном направлении

Fig. 2. Components of thermal flow ingoing into a cell (i, j) (a) and design model of the growth container (b). Symbols: g_{1-4} and h_i are the boundaries and the length of i -layer along the vertical coordinate respectively; Δr_j is the linear dimension of (i, j) -cell in radial direction

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=+0} &= \alpha_b (T|_{z=0} - T_0), \quad T|_{z=0} = T|_{z=+0}, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L-0} &= \alpha_t (T|_{z=L+0} - T_0), \quad T|_{z=L-0} = T|_{z=L+0}, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2-0} &= \alpha_w (T|_{r=r_2+0} - T_0), \quad T|_{r=r_2-0} = T|_{r=r_2+0}, \end{aligned}$$

где $\alpha_b, \alpha_t, \alpha_w$ – коэффициенты теплоотдачи нижней, верхней и боковой поверхностей, Вт/(м²·К); T_0 – температура окружающей среды;

- на внутренней поверхности рабочего объема МТУ (граница Γ_5) и боковой поверхности РК (граница Γ_6)

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1-0} &= \\ &= \alpha_{wv} (T|_{r=r_1-0} - T|_{r=r_1-\delta r+0}) + \varepsilon \sigma (T^4|_{r=r_1-0} - T^4|_{r=r_1-\delta r+0}), \\ T|_{r=r_1-0} &= T|_{r=r_1+0}, \end{aligned}$$

где ε – приведенная степень черноты; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴); α_{wv} – коэффициент теплоотдачи поверхности рабочего объема, Вт/(м²·К).

Положение фронта кристаллизации $z_{cr}(t)$ определяется изотермой расплава $T(z_{cr}(t), t) = T_m$, где T_m – температура кристаллизации.

На нижней границе РК выполняются условия:

$$\lambda_a \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_b(t)-0} = \begin{cases} \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_b(t)+0}, & T_{z=z_b(t)} < T_m; \\ \lambda_l \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_b(t)+0}, & T_{z=z_b(t)} > T_m; \end{cases}$$

$$T|_{z=z_b(t)-0} = T|_{z=z_b(t)+0},$$

где λ_s, λ_l – коэффициенты теплопроводности РК, кристалла и расплава соответственно.

Аналогично записываются граничные условия для поверхности расплав–пар рабочего вещества.

Для учета теплоты кристаллизации на границе фазового перехода, согласно [20, 25–28], используется эффективная теплоемкость рабочего вещества

$$c_{eff} = c(T) + \frac{1}{\rho} L_{cr} \delta(T - T_m),$$

где $\delta(T - T_m)$ – дельта функция; L_{cr} – теплота кристаллизации.

Длина выращиваемого кристалла по радиальным сечениям $j=1$ и $j=2$ равна

$$l_{cr}(t) = z_{cr}(t) - z_b(t), \quad z_b(t) \leq z_{cr}(t) \leq z_t(t).$$

Таким образом, текущая мгновенная скорость роста кристалла по сечениям $j=1$ и $j=2$ с учетом направления движения РК определяется алгебраической суммой двух слагаемых – постоянной за-

данной скорости $V_o = -\frac{dz_b(t)}{dt}$ механического перемещения РК относительно установки в область более низких температур и переменной величины, зависящей от скорости изменения положения изотермы кристаллизации за счет изменения температурного поля по высоте РК при его перемещении

$$V = \begin{cases} 0, z_{cr}(t) \leq z_b(t); \\ \frac{dl_{cr}(t)}{dt} = V_o + \frac{dz_{cr}(t)}{dt}, z_b(t) \leq z_{cr}(t) \leq z_l(t); \\ 0, z_l(t) \leq z_{cr}(t). \end{cases}$$

Следовательно, изменение длины растущего кристалла происходит как за счет перемещения РК, так и из-за смещения положения изотермы кристаллизации относительно установки, которое может быть вызвано изменением температурного поля по высоте контейнера.

Масса выращенного кристалла $m_{cr} = \rho_{cr} S \int_{t_{cr0}}^{t_{crk}} V dt$,

где t_{cr0} , t_{crk} – время начала и окончания процесса образования кристалла; S – площадь поперечного сечения РК.

Для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих тепловые процессы при выращивании кристаллов в МТУ, используется явная схема конечно-разностной аппроксимации производных. Это вызвано тем, что время установления переходных процессов температуры в МТУ составляет десятки минут [24]. Следовательно, при шагах по времени порядка 1 с должна наблюдаться высокая точность расчета температур, а вычислительные возможности современных ПЭВМ позволяют получить решение задачи за приемлемое время.

Расчетные формулы для вычисления температур в выделенных элементах записываются в виде

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + dt \cdot F_{i,j}^k,$$

$$F_{i,j}^k = \frac{1}{(c\rho V)_{i,j}} \cdot \sum_{s=1}^5 Q_s^k,$$

$$T_{i,j}^0 = T_{i,j}^*, \quad i = 1 \dots N; \quad j = 1 \dots 5; \quad k = 0, 1, \dots,$$

где dt – шаг, с; k – номер шага по времени; $T_{i,j}^*$ – температурное поле, полученное в результате расчета стационарного состояния МТУ при верхнем положении РК, предшествующем началу процесса выращивания кристалла.

Для оценки достоверности результатов расчета температурного поля МТУ с помощью разработанной модели проведено сравнение стационарных осевых распределений температуры, полученных на приведенной модели и модели МТУ, реализованной в пакете программ Comsol Multiphysics [23]. Расчеты проводились при формировании в рабочем объеме установки стационарного распре-

деления температуры для 50 % мощности нагревателей и начального положения РК $z_b=0,7$ м.

Сравнительная характеристика полученных результатов позволяет сделать вывод: несмотря на то, что расчетная схема предлагаемой модели МТУ содержит число выделенных элементов на два порядка меньше, чем модель, реализованная в Comsol Multiphysics, температурные поля при соответствующей настройке коэффициентов предлагаемой модели имеют хорошее совпадение. Это дает основание для проведения вычислительных экспериментов на разработанной модели по решению различных задач, возникающих при выращивании кристаллов. Одной из таких задач является выявление различий характеристик роста кристалла при наличии и отсутствии систем регулирования температурного поля проектируемых установок.

На рис. 3 приведены осевые распределения температуры в рабочем объеме МТУ при одинаковых выделениях тепловой мощности и различных положениях РК.

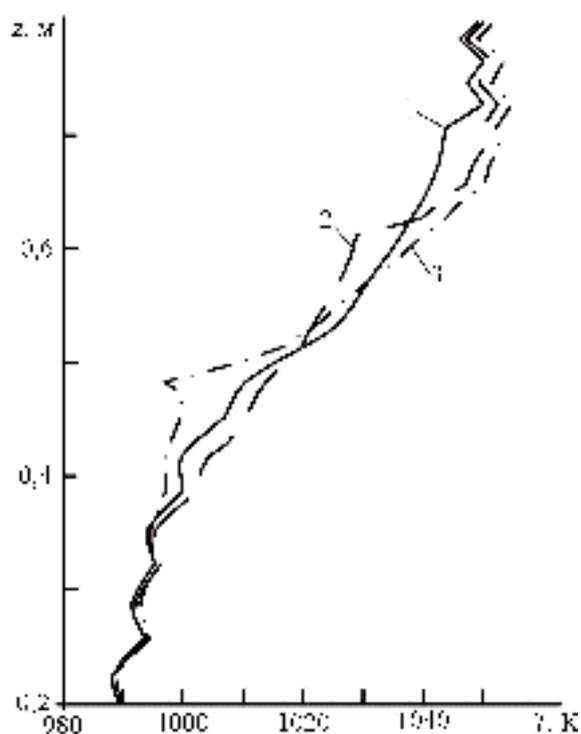


Рис. 3. Осевое распределение температуры в рабочем объеме МТУ при различных положениях РК. Обозначения: 1) $z_b=0,53$; 2) $z_b=0,43$; 3) $z_b=0,29$ м

Fig. 3. Axial temperature distribution in volumetric displacement of multizone thermal installation at different positions of the growth container: 1) $z_b=0,53$; 2) $z_b=0,43$; 3) $z_b=0,29$ m

РК в начальный момент времени $t=k=0$ расположен на подставке при $z_b(0)=0,53$ м. Такому состоянию соответствует первое осевое распределение температуры (рис. 3). Так как положение изо-

термы кристаллизации ($T_m=1020\text{ К}$) $z_{cr}(0)=0,515\text{ м}$, то рабочее вещество находится в расплавленном состоянии. Имитация роста кристалла производится путем продольного осевого перемещения РК вниз. Шаг по времени dt принят равным $0,5\text{ с}$. Поведение оценок характеристик роста кристалла при неизменном осевом распределении температуры в рабочем объеме, соответствующем T_{ij}^* , и неизменном положении фронта кристаллизации относительно установки приведено на рис. 4.

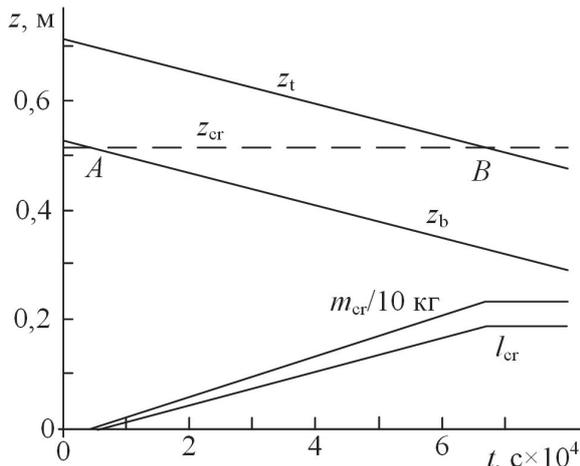


Рис. 4. Оценки роста кристалла при $T_{ij}^k=T_{ij}^*$ ($i=1..58; j=1..5; k=0,1,..$)

Fig. 4. Estimates of crystal growth at $T_{ij}^k=T_{ij}^*$ ($i=1..58; j=1..5; k=0,1,..$)

Скорость перемещения РК принята равной $3 \cdot 10^{-6}\text{ м/с}$. На интервале времени между точками А и В происходит рост кристалла. Длина ожидаемого кристалла составляет $0,185\text{ м}$, масса $2,32\text{ кг}$, время выращивания $\sim 17,18\text{ ч}$, а скорость роста кристалла совпадает со скоростью перемещения РК.

Однако в реальности в процессе выращивания кристалла происходит деформация температурного поля как РК, так и МТУ. Рассмотрим влияние перемещения РК из верхнего положения в нижнее на характеристики роста кристалла и изменение температур при отключенных регуляторах температуры (рис. 5), тепловые мощности нагревателей МТУ определены с помощью алгоритма оценки тепловых мощностей [28]. В качестве начального температурного поля принято $T_{ij}^0=T_{ij}^*$.

Из результатов расчета, представленных на рис. 5, видно, что в отличие от идеализированного варианта скорость роста кристалла отличается от скорости перемещения РК. Происходит отставание начала роста кристалла в связи со смещением изотермы кристаллизации в низкотемпературную область рабочего объема ($<0,51\text{ м}$). Затем наблюдается рост кристалла со скоростью, превышающей скорость снижения контейнера. Это вызвано смещением положения температуры кристаллизации в градиентную область рабочего объема. Продолжительность роста кристалла снижается по срав-

нению со временем выращивания кристалла в идеализированном режиме работы. В конце процесса выращивания кристалла наблюдаются неравномерные участки роста, вызванные неоднородностью структуры термической установки. Осевое распределение температуры в процессе выращивания кристалла заметно изменяется (рис. 3, распределения 2 и 3).

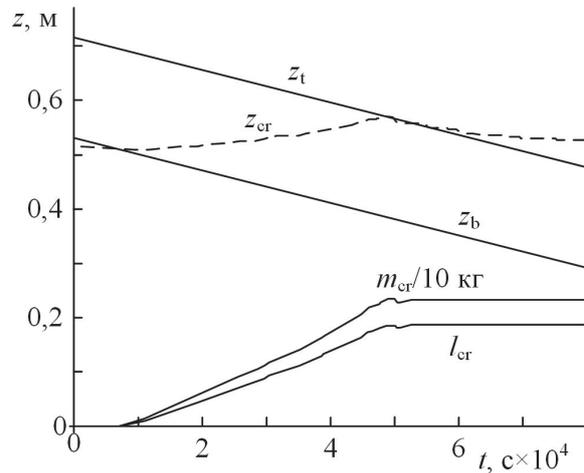


Рис. 5. Оценки роста кристалла при отключенных регуляторах температуры

Fig. 5. Estimates of crystal growth at switched off temperature regulators

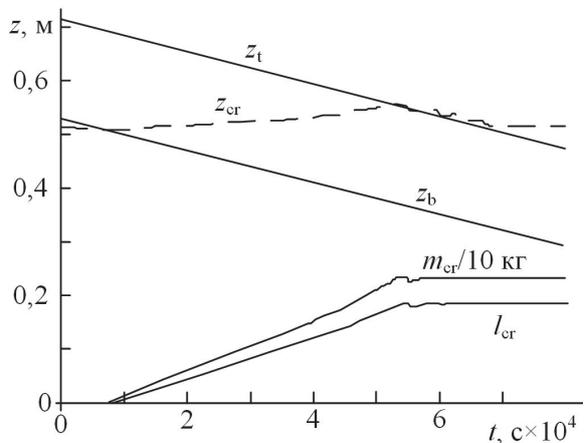


Рис. 6. Оценки роста кристалла при стабилизации температурного поля установки с помощью ПИД-регуляторов

Fig. 6. Estimates of crystal growth at stabilization of the installation temperature field by PID-controllers

Результаты моделирования роста кристалла при стабилизации температурного поля установки с помощью системы управления на базе ПИД-регуляторов [21] (уставки регуляторов температуры нагревателей= const) приведены на рис. 6, 7.

Выполненные расчеты показывают, что, несмотря на поддержание заданного температурного поля в установке системой управления на основе ПИД-регуляторов, распределение температуры в РК в процессе выращивания кристалла претерпе-

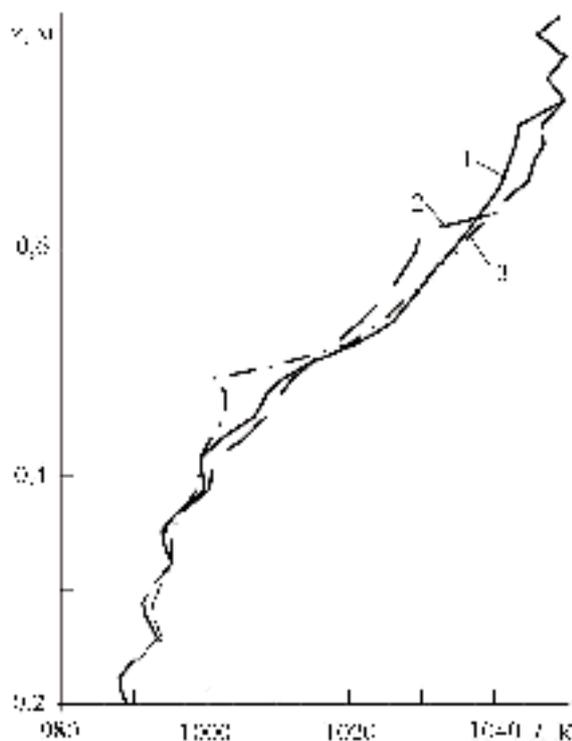


Рис. 7. Осевое распределение температуры в рабочем объеме МТУ при стабилизации температурного поля для различных положений РК. Обозначения: 1) $z_b=0,53$; 2) $z_b=0,43$; 3) $z_b=0,29$ м

Fig. 7. Axial temperature distribution in volumetric displacement of multizone thermal installation at temperature field stabilization for different positions of the growth container: 1) $z_b=0,53$; 2) $z_b=0,43$; 3) $z_b=0,29$ m

вает изменения, что приводит к отклонению характеристик роста кристалла (рис. 6) от идеализированных (рис. 4). Например, продолжительность процесса выращивания кристалла в идеализированном варианте, на ~23 % больше продолжительности при стабилизированном температурном поле и на 40 % больше, чем в процессе выращивания без стабилизации температур. Кроме того, в последних случаях характер роста кристалла во времени явно отличается от линейного, что может быть причиной неоднородности свойств выращенных кристаллов в МТУ рассматриваемого типа [29].

Выводы

1. Модель, разработанная на основе балансовых отношений для принятой расчетной схемы, пригодна при оперативном решении задач, возникающих как на этапе проектирования новых конструкций термических установок, так и на этапе выращивания кристаллов.
2. Результаты вычислительных экспериментов показывают, что фактическое время выращивания кристалла может существенно отличаться от запланированного.
3. Из-за смены положения изотермы кристаллизации, вызванной изменением температурного поля в ростовом контейнере, возможно подплавление уже выращенного кристалла, т. е. скорость роста кристалла не является постоянной величиной, что необходимо учитывать как при экспериментальном выращивании кристаллов, так и проектировании новых установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотозенергетики // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – № 8. – С. 937–948.
2. Наумов А.В. Рынок солнечной энергетики: кризис и прогноз // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2009. – № 2. – С. 4–12.
3. Численное моделирование теплофизических процессов при выращивании кристаллов мультикремния методом Бриджмена–Стокбаргера / В.С. Бердников, М.В. Филиппова, Б.А. Красин, А.И. Непомнящих // Теплофизика и Аэромеханика. – 2006. – Т. 13. – № 2. – С. 275–293.
4. Попов В.Н. Теплоассоперенос в установке получения поликремния методом Бриджмена // Математическое моделирование. – 2010. – Т. 22. – № 6. – С. 38–48.
5. Марков А.В. Выращивание монокристаллов арсенида галлия с высоким структурным совершенством методом вертикально направленной кристаллизации // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2006. – № 6. – С. 16–19.
6. Shay J.L., Wernick J.H. Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties, and Applications. – N.Y.: Pergamon press, 1979. – 244 p.
7. Kral R. Study on influence of growth conditions on position and shape of crystal/melt interface of alkali lead halide crystals at Bridgman growth // Journal of Crystal Growth. – 1982. – V. 360. – P. 162–166.
8. Jones C.L., Capper P., Gosney J.J. Thermal modelling of Bridgman crystal growth // Journal of Crystal Growth. – 1982. – V. 56. – № 3. – P. 581–590.
9. Factors affecting isotherm shape during Bridgman crystal growth / C.L. Jones, P. Capper, J.J. Gosney, I. Kenworthy // Journal of Crystal Growth. – 1984. – V. 69. – № 2–3. – P. 281–290.
10. Chin L., Carlson F.M. Finite element analysis of the control of interface shape in Bridgman crystal growth // Journal of Crystal Growth. – 1983. – V. 62. – № 3. – P. 561–567.
11. Кузнецов О.А., Повещенко Ю.А., Чернышенко О.В. Расчет температурных полей при кристаллизации слитков вертикальным методом Бриджмена // Математическое моделирование. Получение монокристаллов и полупроводниковых структур. – М.: Наука, 1986. – С. 186–192.
12. Civan F., Shlepcevic S.M. Limitation in the apparent heat capacity formulation for heat transfer with phase change // Proc. Okla. Acad. Sci. – 1987. – V. 67. – P. 83–88.
13. A transparent multizone furnace for crystal growth and flow visualization / C.W. Lan, D.T. Yang, C.C. Ting, F.C. Chen // Journal of Crystal Growth. – 1994. – V. 141. – № 3–4. – P. 373–378.
14. Martinez-Tomas C., Muñoz V., Triboule R. Heat transfer simulation in a vertical Bridgman CdTe growth configuration // Journal of Crystal Growth. – 1999. – V. 197. – № 3. – P. 435–442.
15. On-line control of solid-liquid interface by state feedback / C. Batur, A. Srinivasan, W.M.B. Duval, N.B. Singth, D. Golovaty // Journal of Crystal Growth. – 1999. – V. 205. – № 3. – P. 395–409.

16. Rudman M. A volume-tracking method for incompressible multi-fluid flows with large density variations // *Int. J. Numer. Meth. Fluids*. – 1998. – V. 28. – P. 357–378.
17. Математическое моделирование и экспериментальные исследования влияния температурных градиентов на процессы кристаллизации для земных и космических условий / В.И. Стрелов, Б.Г. Захаров, В.С. Сидоров и др. // *Кристаллография*. – 2005. – Т. 50. – № 3. – С. 536–544.
18. Interface shape control using localized heating during Bridgman growth / M.P. Volz, K. Mazuruk, M.D. Aggarwal, A. Cröll // *Journal of Crystal Growth*. – 2009. – V. 311. – № 8. – P. 2321–2326.
19. Numerical simulation of crystal growth in vertical Bridgman furnace / M.J. Crochet, F. Dupret, Y. Ryckmans et al. // *Journal of Crystal Growth*. – 1989. – V. 97. – № 1. – P. 173–185.
20. Swaminathan C.R., Voller V.R. A general enthalpy method for modelling solidification processes // *Metallurgical Transactions B*. – 1992. – V. 23B. – P. 651–664.
21. Филиппов М.М., Грибенюков А.И., Бабушкин Ю.В. Система управления технологическим процессом выращивания кристаллов методом Бриджмена // *Датчики и системы*. – 2012. – № 6. – С. 2–5.
22. Martinez-Tomas C., Muñoz V. CdTe crystal growth process by the Bridgman method: numerical simulation // *Journal of Crystal Growth*. – 2001. – V. 222. – № 3. – P. 435–451.
23. Применение математической модели для сопровождения процесса выращивания кристаллов в многозонных термических установках / М.М. Филиппов., А.И. Грибенюков, В.Е. Гинсар, Ю.В. Бабушкин // *Изв. вузов. Материалы электронной техники*. – 2013. – № 2. – С. 26–31.
24. Трубчатая печь: пат. 1830132 СССР. МПК⁵ F27B 5/06. Заявл. 22.01.91; опубл. 23.07.1993. – Бюл. № 27. – 8 с.
25. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. – Рига: Зинатне, 1980. – 180 с.
26. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
27. Кабанов П.Г. Математическое моделирование процесса кристаллизации жидкого металла в условиях внешнего воздействия // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2007. – Т. X. – № 4 (32). – С. 55–60.
28. Алгоритм оценки мощностей нагревательных элементов в многозонной установке для выращивания кристаллов по Бриджмену / М.М. Филиппов, Ю.В. Бабушкин, А.И. Грибенюков, В.Е. Гинсар // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 110–112.
29. Investigation of ZnGeP₂ crystals by X-Ray topography methods / A.O. Okunev, G.A. Verozubova, V.A. Staschenko, M.M. Philippov // *11th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging*. – St. Petersburg, 2012. – P. 187.

Поступила 21.04.2014.

UDC 621.315.592+004.942

MATHEMATICAL MODEL OF MULTIZONE THERMAL INSTALLATION FOR CRYSTAL GROWTH BY BRIDGMAN METHOD

Yuri V. Babushkin,

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: am@tpu.ru

Maksim M. Philippov,

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: nauka@tpu.ru

Xuan Hung Nguyen,

post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: am@tpu.ru

Aleksandr I. Gribenyukov,

Cand. Sc., Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS,
10/3, Academic Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: loc@imces.ru

The work is devoted to the solution of the problem of developing the complex of mathematical models to solve scientific-technical tasks in the design multizone thermal installations for crystal growing by Bridgman method. The relevance of the research is related to continuously increased requirements to the quality of the growing crystals, for example, for the development of energy-efficient production, renewable energy on the basis of solar battery, created on the basis of mono- and multi-crystalline silicon, in instrumentation as optical and laser components, integrated circuit substrates, soft and hard radiation detectors, in quantum electronics, nonlinear optics, etc. and consequently with the necessity to improve thermal installations and technological processes.

The main aim of the study is to develop the mathematical models that allows in real-time mode with acceptable accuracy forecasting a course of crystal growing in variable thermal conditions.

The methods used in the study. The developed model is implemented on base of the method of elementary balances adopted for the calculation scheme in Matlab. The model allows evaluating the installation temperature field, exploring the mutual influence of thermal processes in the system «growth container – thermal installation», simulating thermal processes in the installation at all stages of the crystal growing, as well investigating various algorithms of controlling thermal power of heaters.

The results. The authors have obtained the estimation of both crystallization isotherm position and crystal growing rate for the vertical Bridgman technique with mechanical movement of growth container. Basing on these estimations the conclusion was made that a change of the temperature field in the growth container at its mechanical movement results in sufficient influence on crystallization isotherm position. Herewith the growth rate can reach the area of negative values that will lead to partial melting of already grown crystal. Besides, the actual time of crystal growing may differ significantly from the planned one on the base of assumption on constant growth rate. The data obtained by calculations should be taken in consideration both at design of new facilities and planning of experimental works on crystal growing.

Key words:

Renewable energy, multi-crystalline silicon, photoelectric converters, modeling of crystal growth, Bridgman technique, method of elementary balances, thermal field, multizone thermal installation.

REFERENCES

1. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. Tendentsii i perspektivy razvitiya solnechnoy fotoenergetiki [Solar Photovoltaics: Trends and Prospects]. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, no. 8, pp. 899–908.
2. Naumov A.V. Rynok solnechnoy energetiki: krizis i prognoz [The solar energy market: crisis and forecast]. *Materialy elektronnoy tekhniki*, 2009, no. 2, pp. 4–12.
3. Berdnikov V.S., Philippova M.V., Krasin B.A., Nepomnyashchikh A.I. Chislennoe modelirovanie teplofizicheskikh protsessov pri vyratshchivanii kristallov multikremniya metodom Bridjmena–Stokbargera [Numerical simulation of thermal processes when growing multicrystalline silicon crystal by the Bridgman–Stockbarger method]. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2006, vol. 13, no. 2, pp. 275–293.
4. Popov V.N. Teplomassoperenos v ustanovke polucheniya polikremniya metodom Bridjmana [Heat and mass transfer in the plant for polysilicon by the Bridgman method]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2010, vol. 22, no. 6, pp. 38–48.
5. Markov A.V. Vyratshchivanie monokristallov arsenida galliya s vysokim strukturnym sovershenstvom metodom vertikalno napravlennoy kristallizatsii [Growing single crystals of gallium arsenide with high structural perfection of the method vertically oriented crystallization]. *Materialy elektronnoy tekhniki*, 2006, no. 6, pp. 16–19.
6. Shay J.L., Wernick J.H. *Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties, and Applications*. N.Y., Pergamon press, 1979. 244 p.
7. Kral R. Study on influence of growth conditions on position and shape of crystal/melt interface of alkali lead halide crystals at Bridgman growth. *Journal of Crystal Growth*, 1982, vol. 360, pp. 162–166.
8. Jones C.L., Capper P., Gosney J.J. Thermal modelling of Bridgman crystal growth. *Journal of Crystal Growth*, 1982, vol. 56, no. 3, pp. 581–590.
9. Jones C.L., Capper P., Gosney J.J., Kenworthy I. Factors affecting isotherm shape during Bridgman crystal growth. *Journal of Crystal Growth*, 1984, vol. 69, no. 2–3, pp. 281–290.

10. Chin L., Carlson F.M. Finite element analysis of the control of interface shape in Bridgman crystal growth. *Journal of Crystal Growth*, 1983, vol. 62, no. 3, pp. 561–567.
11. Kuznetsov O.A., Poveshchenko Yu.A., Chernyshenko O.V. *Raschet temperaturnykh poley pri kristallizatsii slitkov vertikalnym metodom Bridzhmena. Matematicheskoe modelirovanie. Poluchenie monokristallov i poluprovodnikovyykh struktur* [The calculation of temperature fields at solidification of ingots by vertical Bridgman method. Mathematical modeling. Obtaining single crystals and semiconductor structures]. Moscow, Nauka Publ., 1986. pp. 186–192.
12. Civan F., Slipecevic C.M. Limitation in the apparent heat capacity formulation for heat transfer with phase change. *Proc. Okla. Acad. Sci.*, 1987, vol. 67, pp. 83–88.
13. Lan C.W., Yang D.T., Ting C.C., Chen F.C. A transparent multi-zone furnace for crystal growth and flow visualization. *Journal of Crystal Growth*, 1994, vol. 141, no. 3–4, pp. 373–378.
14. Martinez-Tomas C., Muñoz V., Triboule R. Heat transfer simulation in a vertical Bridgman CdTe growth configuration. *Journal of Crystal Growth*, 1999, vol. 197, no. 3, pp. 435–442.
15. Batur C., Srinivasan A., Duval W.M.B., Singh N.B., Golovaty D. On-line control of solid-liquid interface by state feedback. *Journal of Crystal Growth*, 1999, vol. 205, no. 3, pp. 395–409.
16. Rudman M. A volume-tracking method for incompressible multi-fluid flows with large density variations. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 1998, vol. 28, pp. 357–378.
17. Strelou V.I., Zaharov B.G., Sidorov V.S. Matematicheskoe modelirovanie i eksperimentalnye issledovaniya vliyaniya temperaturnykh gradientov na protsessy kristallizatsii dlya zemnykh i kosmicheskikh usloviy [Mathematical modeling and experimental study of the influence of temperature gradients on the crystallization processes for terrestrial and space conditions]. *Crystallography Reports*, 2005, vol. 50, no. 3, pp. 536–544.
18. Volz M.P., Mazuruk K., Aggarwal M.D., Cröll A. Interface shape control using localized heating during Bridgman growth. *Journal of Crystal Growth*, 2009, vol. 311, no. 8, pp. 2321–2326.
19. Crochet M. J., Dupret F., Ryckmans Y. and all. Numerical simulation of crystal growth in vertical Bridgman furnace. *Journal of Crystal Growth*, 1989, vol. 97, no. 1, pp. 173–185.
20. Swaminathan C.R., Voller V.R. A general enthalpy method for modelling solidification processes. *Metallurgical Transactions B*, 1992, vol. 23B, pp. 651–664.
21. Philippov M.M., Gribenyukov A.I., Babushkin Yu.V. Sistema upravleniya tekhnologicheskimi protsessami vyrashchivaniya kristallov metodom Bridzhmena [Control system for technological process of crystal growth by Bridgman technique]. *Datchiki i sistemy*, 2012, no. 6, pp. 2–5.
22. Martinez-Tomas C., Muñoz V. CdTe crystal growth process by the Bridgman method: numerical simulation. *Journal of Crystal Growth*, 2001, vol. 222, no. 3, pp. 435–451.
23. Philippov M.M., Gribenyukov A.I., Ginsar V.E., Babushkin Yu.V. Primenenie matematicheskoy modeli dlya soprovozhdeniya protsessa vyrashchivaniya kristallov v mnogozonnykh termicheskikh ustanovkakh [Application of mathematical model for crystal growing in multizone thermal installations]. *Materialy elektronnoy tekhniki*, 2013, no. 2, pp. 26–31.
24. Ginsar V.E., Desyatov V.A. *Trubchataya pech* [Tube furnace]. Patent USSR, no. 1830132, 1991.
25. Avdonin N.A. *Matematicheskoe opisaniye protsessov kristallizatsii* [The mathematical description of crystallization processes]. Riga, Zinatne Publ., 1980. 180 p.
26. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational heat transfer]. Moscow, Editorial URSS, 2003. 784 p.
27. Kabanov P.G. Matematicheskoe modelirovanie protsessa kristallizatsii zhidkogo metalla v usloviyakh vneshnego vozdeystviya [Mathematical modeling of the liquid metal crystallization under external influence]. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2007, vol. 10, no. 4 (32), pp. 55–60.
28. Philippov M.M., Babushkin Yu.V., Gribenyukov A.I., Ginsar V.E. Algoritm otsenki moshchnostey nagrevatelnykh elementov v mnogozonnoy ustanovke dlya vyrashchivaniya kristallov po Bridzhmenu [Algorithm of estimating heating element power in multiregion device for crystal growth by Bridgman]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 2, pp. 110–112.
29. Okunev A.O., Verozubova G.A., Staschenko V.A., Philippov M.M. Investigation of ZnGeP₂ crystals by X-Ray topography methods. *11th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging*. St. Petersburg, 2012. pp. 187.

Received: 21 April 2014.

УДК 551.345:528.88

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ МЕТАНА В МАЛЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕРАХ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Полищук Юрий Михайлович,

д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; гл. науч. сотр. научно-исследовательского информационного центра ФГБУН «Институт химии нефти СО РАН», Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Полищук Владимир Юрьевич,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; науч. сотр. научно-исследовательского информационного центра ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3. E-mail: vy_polishchuk@hotmail.com

Брыксина Наталья Анатольевна,

канд. геогр. наук, ст. науч. сотр. института прикладной информатики и математической геодезии ФГБОУ ВПО «Балтийский Федеральный университет имени И. Канта», Россия, 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14. E-mail: bryksina83@gmail.com

Покровский Олег Сергеевич,

канд. геол.-минерал. наук, зав. лабораторией биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: oleg@get.obs-mip.fr

Кирпотин Сергей Николаевич,

д-р биол. наук, проф., директор Центра превосходства «Bio-Clim-Land» ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: kirp@mail.tsu.ru

Широкова Людмила Сергеевна,

канд. биол. наук, доцент лаборатории наук о Земле и окружающей среде университета Тулузы, France, 31400, Toulouse, Avenue Edouard Belin, 14. E-mail: liudmila@get.obs-mip.fr

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки методических вопросов использования математического моделирования и космоснимков сверхвысокого разрешения для оценки накопления метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты, которые рассматриваются в качестве наиболее активных источников эмиссии метана в атмосферу в арктических и субарктических районах в условиях глобального потепления последних десятилетий.

Цель исследования: разработка методических вопросов оценки объемов накопления метана в термокарстовых озерах в зоне многолетней мерзлоты на основе математического моделирования и космических снимков сверхвысокого разрешения.

Методы исследования: дистанционные методы исследования полей термокарстовых озер, включая малые озера, с использованием спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, методы геоинформационных систем для анализа спутниковых изображений, методы математического моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер в мерзлотных ландшафтах, методы биогеохимических исследований состава воды в озерах для определения концентрации метана.

Результаты. На основе биогеохимических исследований установлено, что концентрация метана в малых термокарстовых озерах (площадью менее 200–250 м²) в среднем приблизительно в 13 раз превышает концентрацию метана в воде озер, площадь которых более 250 м². На основе данных дистанционных исследований по снимкам сверхвысокого разрешения определены параметры модели, что позволяет осуществить расчёт полей термокарстовых озер применительно к условиям многолетней мерзлоты. Разработана и описана процедура определения объемов накопления метана в термокарстовых озерах, расположенных на определенной территории в зоне мерзлоты.

Ключевые слова:

Многолетняя мерзлота, геоинформационные системы, спутниковые снимки, изменение климата, математическое моделирование.

Введение

Современное глобальное потепление климата, наиболее явно проявляющееся в северных широтах планеты, ускоряет деградацию многолетней мерзлоты. Мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах Сибири и Северной Америки, при потеплении климата может стать источником возникновения еще большего потепления при высвобождении парниковых газов [1]. Углерод в настоящее время находится в связанном состоянии как органическое вещество в слое многолетней мерзлоты на большей части Арктики. Потепление климата может создать положительную обратную связь, при которой более сильное потепление будет приводить к дополнительному высвобождению метана как продукта жизнедеятельности микроорганизмов, перерабатывающих оттаявшее органическое вещество, что способно внести ощутимый вклад в потепление климата.

Среди парниковых газов метан занимает особое место. По вкладу в парниковый эффект он является вторым после углекислого газа. Однако по величине прямого потенциала глобального потепления он в 39 раз, по данным [2] (в расчете на единицу концентрации и для периода 20 лет), превышает углекислый газ. Основными источниками эмиссии метана на северных территориях являются болота и переувлажненные ландшафты, термокарстовые озерные равнины, подводные метангидраты шельфовых морей и крупных водоемов в зоне многолетней мерзлоты и др. По оценкам [1], четверть мирового объема метана сосредоточена в Западной Сибири, значительную часть территории которой занимают своеобразные болотно-озерные ландшафты с бесчисленным множеством озер разных размеров и возраста. Поля термокарстовых озер наиболее чувствительны к росту приземной температуры воздуха, что делает их удобными геоморфологическими индикаторами глобального потепления в дистанционных исследованиях.

Согласно [3, 4], наиболее активным источником эмиссии метана в арктических и субарктических районах являются малые термокарстовые озера (с площадью менее 0,01–0,05 га). Образование термокарстовых водоемов в связи с деградацией многолетней мерзлоты в условиях глобального потепления последних десятилетий наблюдается на Аляске, в Канаде, в Европе, в Сибири [5–9]. В связи с труднодоступностью территорий в зоне мерзлоты исследования изменений термокарстовых озер проводят дистанционными методами. В большинстве таких дистанционных исследований использовались и используются космические снимки Landsat (пространственное разрешение 30 м), архивы которых накапливаются уже четыре десятилетия. Однако малые озера из-за своих небольших размеров не обнаруживаются на снимках Landsat, что требует для их изучения использования снимков высокого и сверхвысокого разреше-

ния, например, Quick Bird с разрешением 0,61 м. Из-за малой ширины полосы съемки (16,5 км для Quick Bird) покрытие территории многолетней мерзлоты такими снимками не превышает единиц процентов, что не позволяет достаточно обоснованно оценить вклад эмиссии метана из малых термокарстовых озер в общий парниковый эффект. Поэтому малые озера, как правило, не учитываются в прогнозных оценках динамики накопления парниковых газов в атмосфере в условиях продолжающегося глобального потепления климата. Более полный учет распространения малых озер на территории мерзлоты возможен с использованием моделирования полей термокарстовых озер, основанного на имитационном подходе [10]. Однако методические вопросы использования математического моделирования и космоснимков сверхвысокого разрешения для оценки объемов термокарстового метана в мерзлотных ландшафтах в настоящее время не разработаны.

В связи с изложенным целью настоящего исследования заключается в разработке методических вопросов оценки объемов накопления метана в термокарстовых озерах в зоне многолетней мерзлоты на основе математического моделирования и космических снимков сверхвысокого разрешения.

Экспериментальный анализ статистических свойств полей термокарстовых озер по космическим снимкам сверхвысокого разрешения

Данные и объект исследования. Исследования проводились на территории Западной Сибири с использованием космических снимков Quick Bird, коллекция которых в распоряжении авторов была достаточно ограниченной и включала 12 снимков. В связи с этим выбор тестовых участков (ТУ) для проведения исследований производился в границах сцен космических снимков в местах активного термокарста [11], определяемого по наибольшему сгущению озер. Общая характеристика выбранных тестовых участков дана в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика тестовых участков и даты съемки
Table 1. Characteristics of test areas (TA) and imaging date

ТУ TA	Тип мерзлоты Permafrost type	Широта	Долгота	Дата съемки Imaging date	Площадь участка, км ² Plot area, km ²
		Latitude	Longitude		
		град.			
1	Островная Insular	63,02	72,53	13.07.2007	47,52
2	Прерывистая Discontinuous	63,07	75,54	30.06.2009	192,80
3		65,29	72,11	01.05.2009	383,80
4		66,09	74,37	15.08.2003	281,12
5		65,52	76,37	05.07.2008	545,46
6		66,35	80,17	28.07.2004	297,91
7		67,51	84,55	28.06.2011	87,49
8	Сплошная Continuous	66,49	70,14	04.07.2008	131,93
9		67,20	74,26	02.08.2004	346,58
10		67,12	78,43	28.08.2005	199,77
11		69,51	72,18	24.08.2003	204,03
12		69,30	68,20	03.08.2006	98,30

Согласно [11], образование термокарстовых озер происходит под воздействием нескольких факторов, главными из которых являются наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. Поэтому большинство исследователей озерных термокарстовых равнин исходят из предположения о том, что в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород криолитозоны распространены преимущественно озера термокарстового происхождения либо озера смешанного генезиса при значительном влиянии термокарстовых процессов. Например, в работах В.И. Кравцовой с соавторами [12, 13] на основе геоморфологического и климатического анализа вся криолитозона Западной Сибири отнесена к числу районов с повсеместным распространением термокарстовых озер. Поэтому озера, исследуемые в настоящей работе дистанционным методом, рассматриваются как термокарстовые озера.

Для проверки репрезентативности выбранных в нашей работе тестовых участков с учетом зональной специфики геокриологической и ландшафтной дифференциации исследуемой территории проводилось сопоставление схемы размещения ТУ с картами геокриологического и ландшафтного зонирования территории Западной Сибири [14, 15]. На рис. 1 представлена карта-схема расположения

подзон многолетней мерзлоты Западной Сибири, на которой видно, что выбранные тестовые участки довольно равномерно распределены по территории исследований.

Распределение тестовых участков по подзонам мерзлоты дано в табл. 2. В наиболее интересных для наших исследований подзонах прерывистого и сплошного распространения многолетней мерзлоты выбрано 6 и 5 тестовых участков соответственно.

Таблица 2. Распределение тестовых участков по подзонам многолетней мерзлоты

Table 2. Distribution of test areas over permafrost subzones

Подзоны мерзлоты Permafrost subzones	Количество ТУ Quantity of TA	ТУ/ТА
Сплошная/Continuous	5	ТУ-2–ТУ-7
Прерывистая/Discontinuous	6	ТУ-8–ТУ-12
Островная/Insular	1	ТУ-1

Аналогично вышеизложенному проведено сопоставление схемы размещения выбранных ТУ карте ландшафтного зонирования [15]. В результате установлено распределение тестовых участков по ландшафтным зонам, представленное в табл. 3, которая показывает, что тестовые участки достаточно равномерно распределены по ландшафтным зонам исследуемой территории.

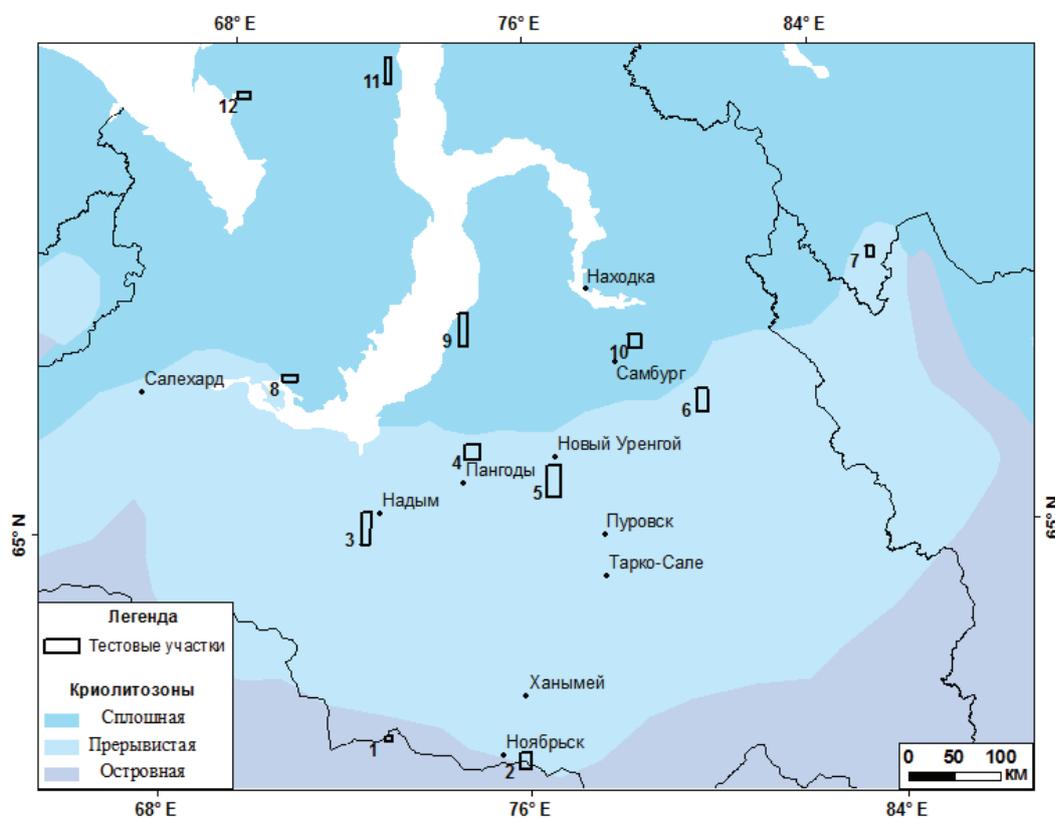


Рис. 1. Карта-схема геокриологического зонирования территории многолетней мерзлоты Западной Сибири с обозначенными границами тестовых участков

Fig. 1. Schematic map of geocryologic zoning of permafrost territory in western Siberia with marked boundaries of test areas

Таблица 3. Распределение тестовых участков по ландшафтными зонам

Table 3. Test area distribution over landscape zones

Ландшафтные зоны Landscape zones	Количество ТУ Amount of TA
Типичная тундра/Typical tundra	2
Южная тундра/South tundra	3
Лесотундра/Forest tundra	2
Северная тайга/Northern taiga	2
Средняя тайга/Medium taiga	3

Согласно табл. 1, все 12 безоблачных космических снимков Quick Bird, выбранных для проведения дистанционных исследований, получены во второй половине летних сезонов (в основном в июле–августе, когда полностью исчезает ледовый покров озер, мешающий выделению озер при дешифрировании снимков) в сравнительно короткий 6-летний период 2003–2009 гг. Обработка космических снимков проведена с использованием стандартных средств геоинформационной системы ENVI 4.4. На каждом из тестовых участков определялось от нескольких сотен до десятков тысяч термокарстовых озер сравнительно малых размеров.

Результаты дистанционных исследований. Рассмотрим результаты анализа данных дистанционного измерения площадей термокарстовых озер на исследованной территории по снимкам сверхвысокого разрешения. Данные о суммарных площадях озер и их средних значениях на всех ТУ приведены в табл. 4. Расчеты показывают, что усредненные по территории прерывистой и сплошной зон мерзлоты средние значения площадей озер составили 2818 и 3506 м² соответственно. Эти данные с учетом среднего значения площади озер в островной зоне (на ТУ-1 в табл. 4) позволяют сделать заключение, что в среднем площади озер увеличиваются в направлении «юг–север».

Таблица 4. Статистика термокарстовых озер по данным дистанционного исследования на разных тестовых участках

Table 4. Statistics of thermokarst lakes according to the data of remote investigation on different test areas

ТУ TA	Число озер Amount of lakes	Суммарная площадь озер, м ² Total area of lakes, m ²	Среднее значение площади озер, м ² Average value of area of lakes, m ²
1	20052	2855567,6	2624,6
2	1088	34026648,5	1696,9
3	18494	13582835,4	734,4
4	3523	9828450,8	2789,8
5	4874	43518058,7	8928,6
6	23962	16984441,8	708,8
7	4320	8851926,7	2049,1
8	8564	15585387,9	1819,9
9	471	1777560,3	3774,0
10	8336	5672160,3	680,4
11	865	3606856,3	4169,8
12	810	5739587,5	7085,9

Очень важным с точки зрения моделирования полей термокарстовых озер является исследование распределения озер по их размерам. Для всех исследованных ТУ на основе результатов дистанционного измерения площадей озер были построены гистограммы распределения числа термокарстовых озер по размерам. Для иллюстрации на рис. 2 приведена гистограмма распределения озер по площадям на ТУ-1, где K_i – относительное число озер, попадающих в каждый i -й интервал гистограммы, определяемое по формуле:

$$K_i = \frac{n_i}{N},$$

где n_i – число озер в каждом интервале гистограммы; i – номер интервала; N – суммарное количество озер на исследуемом тестовом участке.

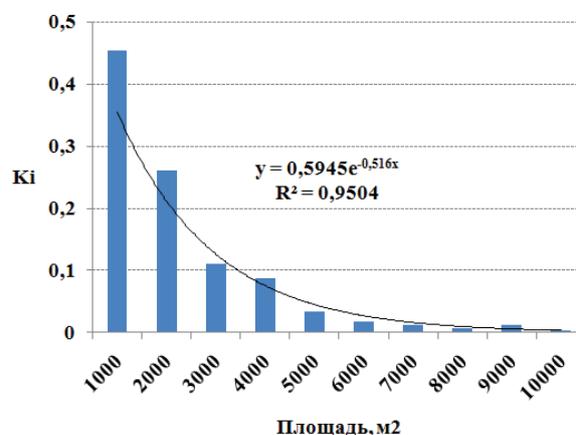


Рис. 2. Пример экспоненциальной аппроксимации эмпирического распределения термокарстовых озер по площадям на ТУ-1

Fig. 2. Exponential approximation of empiric distribution of thermokarst lakes over the areas in TA-1

График гистограммы на рис. 2 демонстрирует характерную закономерность – уменьшение относительного числа озер в интервалах гистограмм по мере увеличения площадей озер. Такая же закономерность была выявлена ранее [10] при анализе аналогичных гистограмм распределения озер по площадям, полученных по результатам дистанционного измерения площадей озер по космическим снимкам Landsat (пространственное разрешение 30 м). Анализ гистограмм распределения озер по площадям показал [16, 17] их хорошее соответствие (по критерию χ^2) экспоненциальному закону распределения. По аналогии с [16, 17] в настоящей работе гистограмма распределения малых озер по их площадям, представленная на рис. 2, допускает аппроксимацию экспоненциальной функцией с высоким уровнем коэффициента детерминации (0,95). Проведенный в нашей работе анализ гистограмм распределения озер по размерам на всех остальных ТУ показал достаточно хорошую аппроксимацию их экспоненциальной функцией, что является основанием использова-

ния разработанной в [16] геоимитационной модели для моделирования полей термокарстовых озер, включающих озера малых размеров.

Краткая характеристика модели пространственной структуры полей термокарстовых озер

Предложенная в [10] геоимитационная модель пространственной структуры полей термокарстовых озер представляет собой совокупность случайных окружностей, каждая из которых отображает в модели отдельное термокарстовое озеро. Возможность выбора окружности в качестве формы береговых границ моделируемых термокарстовых озер экспериментально подтверждена в [18].

Анализ гистограмм распределения координат центров озер на плоскости, проведенный в [16], показал, что экспериментальные законы распределения координат центров озер соответствуют по критерию χ^2 с вероятностью 95 % закону равномерной плотности. Согласно [16, 17], экспериментальные законы распределения термокарстовых озер по их площадям соответствуют экспоненциальному закону распределения. Поэтому в предложенной модели распределение окружностей по их размерам также будет подчиняться экспоненциальному закону в виде:

$$y = \lambda e^{-\lambda s}, \quad (1)$$

где λ – параметр распределения (1).

Ниже приведены следующие основные положения [17], определяющие существенные свойства геоимитационной модели полей термокарстовых озер:

- 1) формы береговых границ озер представлены уравнением окружности с координатами центров x_i, y_i и площадью s_i (i – номер озера);
- 2) пространственные изменения координат центров окружностей и их площадей статистически независимы;
- 3) случайное распределение каждой из координат центров окружностей $x_i, y_i, i=1, n$, определяется законом равномерной плотности;
- 4) случайное распределение окружностей по их размерам определяется показательным законом распределения в виде (1) с параметром λ , который определяется по экспериментальным данным на основе дистанционных исследований. Согласно [16, 17], значение параметра λ для моделирования озер на каждом тестовом участке рассчитывается как величина, обратная экспериментально определенной по космическим снимкам средней площади озер на данном тестовом участке.

Разработанный программный комплекс имитационного моделирования полей термокарстовых водных объектов достаточно подробно описан в [19]. Результат моделирования представляется в виде модельного поля озер (рис. 3), пространственные статистические свойства которого соответствуют экспериментально установленным по спутниковым снимкам. Материалы исследований

[17, 19] подтверждают адекватность модели экспериментальным данным.

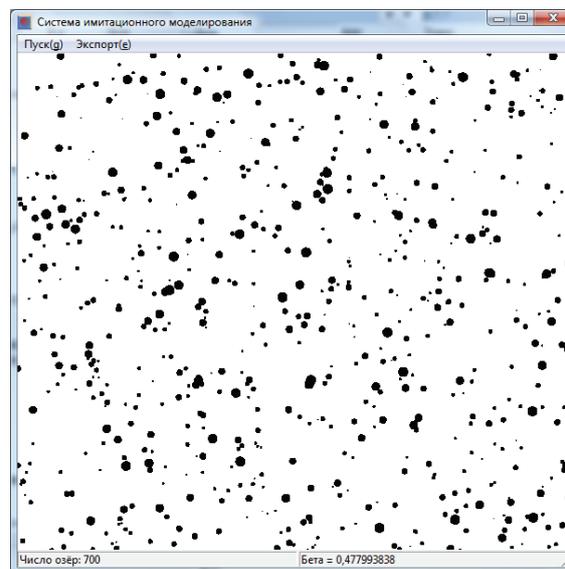


Рис. 3. Модельное поле термокарстовых озер

Fig. 3. Model field of thermokarst lakes

Расчет объема накопления метана в термокарстовых озерах Западной Сибири на основе моделирования полей термокарстовых озер

Для определения объема накопления метана в термокарстовых озерах требуется знать его концентрацию в воде каждого озера и его площадь и глубину. Результаты наземных биогеохимических исследований концентрации метана в термокарстовых озерах, которые проводились в зоне мерзлоты Западной Сибири в период 2008–2013 гг., опубликованы в работах О.С. Покровского с соавторами [3, 20, 21].

Важными для решения поставленной задачи являются вопросы исследования взаимосвязи между концентрацией метана в воде термокарстовых озер и их площадями. В [3, 20, 21] на основе анализа результатов биогеохимических исследований состава воды термокарстовых озер установлено, что концентрация метана существенно зависит от размеров озер: в малых озерах с площадью менее нескольких сотен квадратных метров она более чем на порядок превышает ее величину в больших озерах с размерами, превышающими указанные выше.

На рис. 4 представлен график зависимости концентрации метана в озерной воде от площади термокарстовых озер по результатам биогеохимических исследований термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири, методика которых изложена в ряде наших работ, например в [21]. На графике красные точки представляют измеренные значения концентрации метана в отдельных малых озерах с площадью менее 250 м², а синими точками отображаются измеренные значения кон-

центрации метана в озерах с площадью более 250 м². Отрезки сплошных линий красного и синего цвета показывают средние значения концентрации метана в малых и больших озерах соответственно. Из графика на рис. 4 видно, что концентрация метана в малых озерах (площадь менее 200–250 м²) в среднем приблизительно в 13 раз превышает концентрацию метана в воде озер, площадь которых более 250 м².

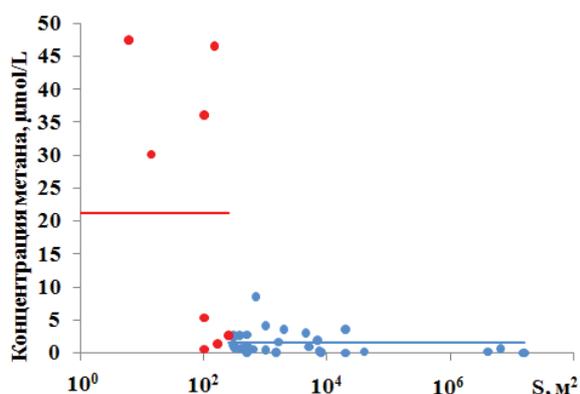


Рис. 4. Зависимость концентрации метана от площади термокарстовых озер

Fig. 4. Dependence of methane concentration on area of thermokarst lakes

Как показали результаты наземных исследований в термокарстово-озерных равнинах Западной Сибири, глубина озер также зависит от их размеров. В связи с этим представляет интерес изучить взаимосвязь глубины и площади термокарстовых озер. Вид этой зависимости необходимо учитывать при определении объема воды в озерах при расчете массы накопленного метана в озерах, расположенных на определенной территории. На рис. 5 представлена зависимость глубины термокарстовых озер от их площади, основанная на результатах измерения глубины и площади 34 реальных озер различных размеров, расположенных на территории многолетней мерзлоты в Западной Сибири.

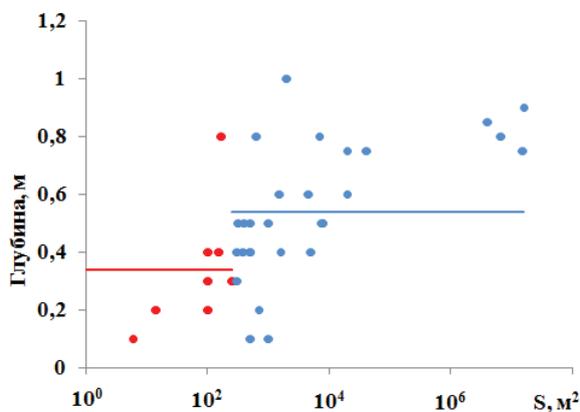


Рис. 5. Зависимость глубины термокарстовых озер от их площади

Fig. 5. Dependence of the depth of thermokarst lakes on their area

На рис. 5, как и на предыдущем графике, озера условно разделены на 2 группы: малые, с площадью менее 250 м² (обозначены на графике красными точками), и сравнительно большие (показаны синими точками), площадь которых превышает 250 м². Из графика на рис. 5 видно, что в среднем глубина больших озер приблизительно в 1,5 раза превышает глубину малых озер. По данным измерений глубина малых и больших озер в среднем составляет 0,34 и 0,54 м соответственно. Эти величины могут быть использованы при оценке запасов метана в термокарстовых озерах на основе моделирования.

Масса метана, накопленного в n озерах, расположенных на рассматриваемой территории мерзлоты, может быть рассчитана в виде:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где m_i – масса метана в i -м озере.

Масса накопленного метана в каждом i -м озере может быть определена по формуле:

$$m_i = C_i h_i S_i, \quad (3)$$

где C_i – концентрация метана в воде i -го озера; h_i – глубина i -го озера; S_i – площадь i -го озера.

Процедура оценки объемов накопленного метана в водных термокарстовых объектах на заданной территории мерзлоты на основе геоимитационного моделирования заключается в следующем. В процессе моделирования полей этих объектов находится площадь каждого i -го модельного объекта. В зависимости от величины площади (больше или меньше 250 м²) определяются средние значения концентрации метана и глубины озера (рис. 4, 5) и рассчитывается в соответствии с (3) масса метана в данном i -м модельном озере. Затем по формуле (2) рассчитывается общая масса накопленного метана во всех модельных озерах на заданной территории мерзлоты.

Заключение

В статье рассмотрены методические вопросы использования математического моделирования и космоснимков сверхвысокого разрешения для оценки накопления метана в малых термокарстовых озерах в зоне мерзлоты, которые рассматриваются как наиболее активные источники эмиссии метана в атмосферу в арктических и субарктических районах в условиях глобального потепления последних десятилетий. Такие озера из-за своих малых размеров до сих пор, как правило, не учитываются в прогнозах динамики накопления парниковых газов в атмосфере.

Для проведения исследований использованы дистанционные методы исследования полей термокарстовых озер на основе спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, методы геоинформационных систем для анализа спутниковых изображений, методы математического моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер в мерзлоте.

ных ландшафтах, методы биогеохимических исследований состава воды в озерах с целью определения концентрации метана. На основе биогеохимических исследований установлено, что концентрация метана в малых термокарстовых озерах (площадью менее 200–250 м²) в среднем приблизительно в 13 раз превышает концентрацию метана в воде озер, площадь которых более 250 м².

На основе экспериментальных данных, полученных по снимкам сверхвысокого разрешения, определены параметры геоимитационной модели, позволяющей осуществить математическое моде-

лирование полей термокарстовых озер применительно к условиям мерзлотных ландшафтов арктических регионов. Разработана и описана процедура определения объемов накопления метана в озерах, расположенных на определенной территории мерзлоты, на основе результатов математического моделирования пространственной структуры полей термокарстовых озер.

Работа выполнена в рамках проекта по договору с Минобрнауки РФ № 14.B25.31.0001 (BIO-GEO-CLIM) от 23.06.2013 г. и при поддержке грантов РФФИ по проектам № 14-35-50521 мол_нр и № 14-01-31489 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальные изменения климата: «метановая бомба» – наукообразный миф или потенциальный сценарий? / А.И. Жилиба, Г.А. Вандышева, К.Г. Грибанов, В.И. Захаров // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2011. – Т. 2. – № 1 (3). URL: http://www.wold.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2011_1/documents/Zhiliba.pdf (дата обращения: 19.11.2014).
2. Кароль И.Л. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 11. – С. 5–12.
3. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S. Audry, J. Viers, B. Dupre // Biogeosciences. – 2011. – V. 8. – P. 565–583. DOI: 10.5194/bg-8-565-2011.
4. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling / A.F. Sabrekov, B.R.K. Runkle, M.V. Glagolev, I.E. Kleptsova, S.S. Maksyutov // Environ. Res. Lett. – 2014. – № 9. – P. 1–9. DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/045008.
5. Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. – P. 1–11. DOI: 10.1029/2005JG000150.
6. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960–1997 // Permafrost and Periglacial Processes. – 2000. – V. 11. – P. 55–69.
7. Distribution of Thermokarst Lakes and Ponds at Three Yedoma Sites in Siberia / G. Grosse, V. Romanovsky, K. Walter, A. Morgenstern, H. Lantuit, S. Zimov // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost. – Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. – P. 551–556.
8. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland // Permafrost and Periglacial Processes. – 2003. – V. 14. – P. 19–27.
9. Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 4. – С. 88–96.
10. Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Имитационное моделирование полей термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 1. – С. 53–60.
11. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М.: Наука, 2006. – 252 с.
12. Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. География. – 2009. – № 3. – С. 33–42.
13. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменения размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13. – № 2. – С. 16–26.
14. Атлас СССР / отв. ред. Т.П. Сидоренкова. – М.: Главное управление геодезии и картографии при СМ СССР, 1984. – 260 с.
15. Ландшафтная карта СССР / под ред. И.С. Гудилина. – М.: Моск. госуд. университет, 1987. URL: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/data/landscapes/ (дата обращения: 19.11.2014).
16. Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Имитационное моделирование полей термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 1. – С. 53–60.
17. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6 // In Book: Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / Ed. by O. Pokrovsky. – NY: Nova Science Publishers, 2014. – P. 205–234. DOI: 10.978-94-007-4569-8.
18. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Дистанционные исследования изменчивости формы береговых границ термокарстовых озер на территории вечной мерзлоты Западной Сибири // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 1. – С. 61–64.
19. Полищук В.Ю. Программный комплекс имитационного моделирования динамики полей термокарстовых озер в зонах вечной мерзлоты // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 1. – С. 125–128.
20. Early diagenesis processes and their effect on organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lakes / S. Audry, O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova et al. // Biogeosciences Discuss. – 2011. – V. 8. – P. 8845–8894. DOI: 10.5194/bgd-8-8845-2011.
21. Покровский О.С., Широкова Л.С., Кирпотин С.Н. Микробиологические факторы, контролирующие цикл углерода в термокарстовых водных объектах Западной Сибири // Вестник ТГУ. Биология. – 2012. – № 3. – С. 199–217.

Поступила 21.11.2014 г.

UDC 551.345:528.88

METHODICAL ISSUES OF EVALUATING METHANE CAPACITY IN SMALL THERMOKARST LAKES OF WESTERN SIBERIA PERMAFROST

Yury M. Polishchuk,

Dr. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: yupolishchuk@gmail.com

Vladimir Y. Polishchuk,

Cand. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vy_polishchuk@hotmail.com

Natalia A. Bryksina,

Cand. Sc., Kant Baltic Federal University, 14, A. Nevskogo Street,
Kaliningrad, 236041, Russia. E-mail: bryksina83@gmail.com

Oleg S. Pokrovsky,

Cand. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: oleg@get.obs-mip.fr

Sergey N. Kirpotin,

Dr. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: kirp@mail.tsu.ru

Liudmila S. Shirokova,

Cand. Sc., University of Toulouse, UMR 5563 CNRS, 14, Avenue Edouard Belin,
31400, Toulouse, France. E-mail: liudmila@get.obs-mip.fr

The relevance of the paper is caused by the need to develop methodological issues of using mathematical modeling and ultrahigh resolution satellite imagery to assess the accumulation of methane in small thermokarst lakes in the permafrost zone, which are considered as the most active sources of methane emissions to the atmosphere in the Arctic and Subarctic regions under global warming of recent decades.

The main aim of the study is to develop methodological issues of assessing the amount of methane accumulation in thermokarst lakes in the permafrost, based on mathematical modeling and ultrahigh resolution satellite images.

Methods: remote sensing of thermokarst lakes fields, including small lakes, using satellite images of high and very high spatial resolution and techniques of geographic information systems for the analysis of satellite images, the methods of mathematical modeling of the spatial structure of the thermokarst lakes fields in permafrost landscapes, methods of biogeochemical studies of water bodies to determine the concentration of methane.

The results. On the basis of biogeochemical studies the authors have determined that methane concentration in small thermokarst lakes (with area less than 200–250 m²) is on average about 13 times higher than its concentration in water of lakes, which are more than 250 m². Based on the remote research data on high resolution images the authors defined the parameters of the model that allows calculating fields of thermokarst lakes in the conditions of permafrost. The authors developed and described the procedure for determining methane accumulation volumes in thermokarst lakes located in a particular territory of the permafrost zone.

Key words:

Permafrost, geoinformation systems, satellite imagies, climate changing, mathematical modeling.

The research was carried out within the project under the agreement with the Ministry of Education and Science of the RF no. 14.B25.31.0001 (BIO-GEO-CLIM), 23.06.2013, supported by the grants of RFBR by the projects no. 14–35–50521 мол_нр и № 14–01–31489 мол_а.

REFERENCES

1. Zhiliba A.I., Vandysheva G.A., Gribov K.G., Zakharov V.I. Globalnye izmeneniya klimata: «metanovaya bomba» – naukoobrazny mif ili potentsialny stsenary? [Global change of climate: «Methane bomb» is a pseudoscientific myth or potential scenario?]. *Environmental dynamics and global change of climate*, 2011, vol. 2, no. 1 (3). Available at: [http://www.world.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2011_1/documents/ Zhiliba.pdf](http://www.world.ugrasu.ru/international/unesco/journal/content/2011_1/documents/Zhiliba.pdf) (accessed 19 November 2014).
2. Karol I.L. Otsenki kharakteristik odnositel'nogo vklada parnikovykh gazov v globalnoye potepeniye klimata [Evaluation of the relative contribution of greenhouse gases in global warming]. *Me-teorology and hydrology*, 1996, no. 11, pp. 5–12.
3. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 565–583. DOI: 10.5194/bg-8-565-2011.

4. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling. *Environ. Res. Lett.*, 2014, no. 9, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/045008.
5. Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images. *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, pp. 1–11. DOI: 10.1029/2005JG000150.
6. Zuidhoff F.S., Kolstrup E. Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalén, Northern Sweden, especially 1960–1997. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, vol. 11, p. 55–69.
7. Grosse G., Romanovsky V., Walter K., Morgenstern A., Lantuit H., Zimov S. Distribution of Thermokarst Lakes and Ponds at Three Yedoma Sites in Siberia. Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost. Fairbanks, Alaska, June 29 – July 3, 2008. pp. 551–556.
8. Luoto M., Seppala M. Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, pp. 19–27.
9. Dneprovskaya V.P., Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Izmeneniye termokarsta v zone preryvistogo rasprostraneniya vechnoy merzloty Zapadnoy Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov [Study of thermokarst changes in zone of discontinuous permafrost of Western Siberia based on space images]. *Study of Earth from Space*, 2009, no. 4, pp. 88–96.
10. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu. Imitatsionnoye modelirovaniye poley termokarstovykh ozer na territorii mnogoletney merzloty [Imitation modeling of thermokarst lakes fields in permafrost]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 53–60.
11. Viktorov A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta* [Main problems of landscape mathematical morphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 252 p.
12. Kravtsova V.I. Rasprostraneniye termokarstovykh ozer v Rossii [Dissemination of thermokarst lakes in Russia]. *Vestnik of Moscow State University, Ser. Geography*, 2009, no. 3, pp. 33–42.
13. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Izmeneniye razmerov termokarstovykh ozer v razlichnykh rayonakh Rossii za poslednie 30 let [Changes of thermokarst lake areas in different regions of Russia for last three decades]. *Cryosphere of Earth*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 16–26.
14. *Atlas SSSR* [Atlas of the USSR]. Ed. by T.P. Sidorenkova. Moscow, GUGK SM USSR, 1984. 260 p.
15. *Landshaftnaya karta SSSR* [Landscape map of the USSR]. Ed. by I.S. Gudilin. Moscow, Moscow State University Press, 1987. Available at: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/data/landscapes/ (accessed 19 November 2014).
16. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. *Geoimitatsionnoye modelirovaniye poley termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* [Geoimitation modeling of thermokarst lakes fields in permafrost zones]. Khanty-Mansiysk, UIP USU publ., 2013. 129 p.
17. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Ch. 6. In Book: *Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems*. Ed. by O. Pokrovsky. NY, Nova Science Publishers, 2014. pp. 205–234. DOI: 10.978-94-007-4569-8.
18. Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. Distanttsionnye issledovaniya izmenchivosti formy beregovykh granits termokarstovykh ozer na territorii vechnoy merzloty Zapadnoy Sibiri [Remote study of variability of coastal boundaries forms of thermokarst lakes in the permafrost of West Siberia]. *Study of Earth from Space*, 2012, no. 1, pp. 61–64.
19. Polishchuk V.Yu. Programmy kompleks imitatsionnogo modelirovaniya dinamiki poley termokarstovykh ozer v zonakh vechnoy merzloty [Program complex of simulating thermokarst lake fields dynamics in areas of permafrost]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2013, no. 1, pp. 125–128.
20. Audry S., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S. Early diagenesis processes and their effect on organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lakes. *Biogeosciences Discuss*, 2011, vol. 8, pp. 8845–8894. DOI: 10.5194/bgd-8-8845-2011.
21. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin C.N. Microbiologicheskie faktory, kontroliruyushchie tsikl ugleroda v termokarstovykh vodnykh obektakh Zapadnoy Sibiri [Microbiological factors, controlling carbon cycle in the water of thermokarst bodies of Western Siberia]. *Vestnik TGU. Biologiya*, 2012, no. 3, pp. 199–217.

Received: 21 November 2014.

УДК 504.064.2.001.18

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КАРТ ГИДРОИЗОГИПС НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МОРФОСТРУКТУРЫ РЕЛЬЕФА

Лукин Анатолий Алексеевич

канд. геол.-минерал. наук

Лукин Алексей Анатольевич

канд. геол.-минерал. наук, ст. преподаватель кафедры геофизики
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lukin@tpu.ru

Лимарева Анна Алексеевна

специалист отдела мониторинга окружающей среды
ООО «ОЙЛТИМ Экосервис», Россия, 634003, г. Томск,
пер. Телевизионный, 3. E-mail: anuta-lim@mail.ru

Цель исследования – разработка новой методики построения карт гидроизогипс, отражающих с прогнозной точностью структуру фильтрационных потоков при минимальном объеме исходной информации по напорам подземных вод. Актуальность разработки определяется принципиально новым подходом к построению карт на основе детерминированной модели контроля напорного поля водоносных горизонтов – модели морфоструктуры рельефа. Все существующие методы и технологии используют вероятностные модели распределения величин напоров при картировании изопьез. В статье приводятся: формулировки предмета исследования и проблемы, решаемой разрабатываемой методикой; принятое содержание основных понятий; краткая характеристика гидрогеологических условий объекта исследования; постулируемые положения морфоструктурно-гидрогеологического анализа; правила реализации положений в методике построения прогнозной крупномасштабной карты гидроизогипс; карта гидроизогипс, построенная на основе модели морфоструктуры рельефа для участка хозяйственно-питьевого водозабора подземных вод горнорудного предприятия, и оценка её достоверности; сравнительные оценки двух методик составления карт – разрабатываемой и принятых. Главное различие методик – их модельное содержание или основа. Разрабатываемая методика базируется на детерминированной модели обусловленности структуры фильтрационного потока морфоструктурой рельефа, принятые – на вероятностных моделях распределения напоров в точках наблюдения. В разрабатываемой методике положение линейных и площадных элементов структуры фильтрационных потоков, выраженных в напорном поле, задаются неизменными в пространстве и времени моделью морфоструктуры рельефа, в принятых это положение является неопределенным. Различны требования к объему исходной информации, удовлетворяющему тем или иным нормативам точности. При построении карты по разрабатываемой методике точность отражения структуры фильтрационного потока и пространственного распределения характеристик его напорного поля определяется конечным и незначительным числом скважин. Для получения такой же точности карт с построением по принятым методикам требуется объем исходной информации в разы больший.

Ключевые слова:

Грунтовый водоносный горизонт, карта гидроизогипс, морфоструктурно-гидрогеодинамическая методика, структура фильтрационного потока, морфоструктура рельефа, деформация гидродинамической сетки, ортогональная волновая модель, прямая и обратная гидрогеофизические задачи.

Предмет исследования, решаемая проблема, исходные понятия

Цель исследования, решаемая проблема. За последний ряд десятилетий мы не находим опубликованных исследований, специально посвященных разработке методики построения карт гидроизогипс. Сошлемся только на учебную литературу [1], где наиболее полно излагается общепринятая в настоящее время методика. Так как для студентов предусматривается «рукопашный» вариант ее использования, то в методике оговариваются условия грубых ошибок при формальном ее применении. Главные из этих условий: учет форм рельефа, на которых находятся соседние скважины при интерполяции изменения напоров между ними, а также отметок естественных водопроявлений (урезов рек и озер, родников и др.).

При построении карт гидроизогипс, как и при построении любой сложной геологической поверх-

ности, используются принципы и методы геометрии недр. Они, в свою очередь, основываются на принципах и методах аналитической геометрии и других разделов математики. В современных программных комплексах компьютерных технологий отражения разнообразных геофизических и геохимических полей реализован не только линейный принцип интерполяции, но и вероятностные модели распределения величин измеряемых параметров.

В связи с предыдущим обозначим цель и предмет нашего исследования: разработка методики отражения модели морфоструктуры рельефа, заданной горизонталями его поверхности на топографической карте необходимого масштаба и дифференцируемой определенными элементами морфоструктуры, в структуре грунтового фильтрационного потока, выраженной изолиниями равных напоров зеркала грунтовых вод при построении карты гидроизогипс в условиях ограничен-

ной исходной информации по уровням подземных вод в скважинах. Будем называть методику морфоструктурно-гидрогеодинамической.

Разрабатываемая морфоструктурно-гидрогеодинамическая методика является инструментом решения проблемы изучения и отражения структурной взаимосвязи следствия (потоков грунтовых вод) причиной (рельефом земной поверхности). Но рельеф как причина также контролирует (структурирует) распределение солнечного тепла, воздушные потоки, атмосферные осадки, фации пород зоны аэрации, типы почв и растительность, то есть все внешние природные условия формирования теплового и водного баланса и инфильтрационного питания грунтовых водоносных горизонтов. Таким образом, карты гидроизогипс, построенные по морфоструктурно-гидрогеодинамической методике, прямо отражают общую природную структуру питания и перетекания между горизонтами и прямо решают задачу количественной оценки и пространственной дифференциации структуры водного баланса фильтрационного потока [2]. Из этого следует принципиальное отличие в использовании двух типов карт, полученных по разрабатываемой и общепринятой методикам, в качестве основы для расчетных схем. Карты первого типа решают прямую гидрогеофизическую задачу – выражение в структуре и характеристиках напорного поля (термин «напорное поле» или «напорное гидрогеодинамическое поле водоносного горизонта» нами используется по аналогии с терминами «поле пьезометрических напоров» или «поле давлений подземных вод», которые ввел Н.А. Огильви [3]), морфоструктуры рельефа, заданного его моделью. Гидродинамические расчеты на основе карт гидроизопьез, построенных по общепринятой методике, в том числе с использованием компьютерных технологий и вероятностных моделей, могут решать только обратные задачи. Отмеченные различия в своей общей основе соответствуют понятиям и принципу разделения прямых и обратных задач, принятых в гидрогеодинамике [4] и геофизических методах разведки МПИ [5].

Принятое содержание основных понятий. Ключевыми понятиями при разработке методики являются гидрогеодинамическая структура фильтрационного потока и морфоструктура рельефа.

Структуру фильтрационного потока математически и физически формально определяют как положение вектора скорости фильтрации в пространственных координатах [4, 6, 7]. В математическом анализе и исчислении потоков, соответственно, различают одно- (линейные) и двух- (плоские: плановые и профильные) и трехмерные потоки. Структура и мерность потока определяются особенностями деформации гидрогеодинамической сетки движения потока – линий равного напора и линий тока.

В морфоструктурно-гидрогеологическом анализе [2] сложные трехмерные деформации гидрогеодинамических сеток фильтрационных потоков, заданных картами гидроизогипс и гидроизопьез, мы

классифицируем и районируем на основе ортогональной волновой модели. В модели выделяются четыре типа потоков. Исходя из технологии выделения типов, *под гидрогеодинамической структурой фильтрационного потока будем понимать систему взаимосвязанных пространственных элементов потока, различающихся знаком кривизны поверхности напорного поля по ее простиранию и падению и характером потоков (расходящиеся–сходящиеся, нисходящие–восходящие).* Структуру потока в пространственных элементах формируют линейные элементы поверхности напорного поля: 1) линии перегиба поверхности в ортогональных направлениях (линейные границы пространственных типов) и 2) гребневые и подошвенные (килевые) линии напорной поверхности (линейные источники и стоки фильтрационных потоков).

Морфоструктура рельефа. Понятие о морфоструктурах как выражении «геологических явлений, взаимодействующих с географическими» или как об орографических и тектонически целостных (единых) образованиях было введено И.П. Герасимовым [8]. В геоморфологии возникло и быстро развивалось новое направление – структурная геоморфология [9], предметом изучения которой являются морфоструктуры рельефа. В терминологическом справочнике по структурной геоморфологии и неотектонике [10] приводится уже 28 определений понятия «морфоструктура». Эти определения отражают общий содержательный смысл взаимосвязи морфологии рельефа с геологическими структурами, который обозначен в определении И.П. Герасимова, и не могут использоваться в конкретном методическом приложении при решении задач оценки структурного взаимодействия рельефа и фильтрационных потоков подземных вод. *Поэтому морфоструктуру рельефа, в соответствии с нашей методикой ее отражения, будем определять как системное единство и взаимосвязь линейных и площадных форм (элементов), причинно определяющих структуру распределения водных (поверхностных и подземных) и литопотоков.* При этом линейные и площадные элементы поверхности рельефа классифицируются и выделяются также на основе ортогональной волновой модели. То есть картографически в морфоструктуре рельефа показываются водораздельные и тальвеговые (гребневые и килевые) линии и линейные границы площадных форм, разделяющие их на четыре типа по сочетанию знака кривизны поверхности рельефа по простиранию и падению (горизонтальям и градиентным линиям). *Карта же морфоструктуры рельефа, представленная этими элементами, используется далее как морфоструктурная модель рельефа в разрабатываемой морфоструктурно-гидрогеодинамической методике построения карт гидроизогипс и гидроизопьез водоносных горизонтов.*

Таким образом, «морфоструктура рельефа» в нашем понимании и употреблении не несет содер-

жательного смысла, который вкладывается в него в структурной геоморфологии, но характеризует рельеф как самостоятельную систему со свойственной ему структурой. В этом отношении приведенное нами определение «морфоструктура (или морфологическая структура) рельефа» аналогично понятиям «структура земной поверхности (ЗП)» [11] или «структура рельефа ЗП» [12] в геоморфологии.

Последнее замечание к использованию терминов и понятий при разработке методики. Как известно, поверхность напорного поля гравитационных фильтрационных потоков гидростатической природы отражает рельеф земной поверхности опосредованно. Даже для верхних (грунтовых) водоносных горизонтов карты гидроизогипс имеют более сглаженные формы, чем топография рельефа соответствующего масштаба. Поэтому в нашей методике морфоструктурная модель рельефа чаще строится не на основе поверхности рельефа, отраженной на топографической карте, а на основе *структурных поверхностей рельефа* того или иного порядка. Методики их построения разрабатываются в морфометрии рельефа (направление геоморфологии). К структурным поверхностям относятся, например, базисные и вершинные поверхности [13]. Первые нами широко используются при построении карт гидроизогипс и гидроизопьез [2].

Характеристика объекта исследования

Местоположение и общие условия. Объектом нашего исследования является район горнорудного предприятия, занимающегося разработкой и обогащением руд месторождения золота, а при построении карты гидроизогипс – участок подземного водозабора предприятия. Положение района в общем плане: в географическом и административном – Восточный Казахстан; в геологоструктурном и рудноформационном отношениях – Алейская подзона Рудно-Алтайской структурноформационной зоны; в морфоструктурном плане – западное низкогорье Ульбинского хребта Горного Алтая; гидрографическая система – приводораздельные бассейны малых рек бассейна р. Ульба, правобережного притока Иртыша. Положение района в системе регионального гидрогеологического районирования [14] – западная часть Алтайской гидрогеологической складчатой области. Водовмещающие породы – осадочные, осадочно-вулканогенные и интрузивные образования герцинских складчатых структур. Рыхлые отложения в геологическом и гидрогеологическом строении района имеют подчиненное значение и незначительные мощности.

Отмеченные общие условия определяют главные черты в формировании структуры фильтрационных потоков подземных вод района и участка. Геологическое строение обуславливает господство трещинных коллекторов, трещинных типов подземных вод и трещинных систем фильтрационных потоков. Среди них различают грунтовые потоки трещиннопластовых вод в зоне трещиноватости выветривания и потоки напорных трещинножилых

вод в проницаемых зонах разломов и линейной трещиноватости разнообразного генезиса. Первые развиты на водораздельных (междуречных) пространствах и являются питающими системами. Вторые системы, дренирующие (расходующие) фильтрационные потоки, способствуют формированию и развитию долин ручьев и речек, поскольку фильтрационный поток, собираясь в проницаемую систему дренажа, «вынужден» подниматься вверх, выходить на дневную поверхность и переходить в поверхностный водоток. Формируется аллювий, а в обводненной части аллювиальных отложений – поровопластовые потоки подземных вод. В районе их распространение ограничено из-за условий развития бассейнов водосбора малых рек.

В заключение общей характеристики сформулируем одно из базовых положений морфоструктурно-гидрогеодинамической методики отражения на картах гидроизогипс и гидроизопьез структуры фильтрационных потоков: *структура фильтрационного потока в определенном вышележащем пространстве и времени.*

Данные по морфометрии, климату и общему водному балансу. Эти данные определяют характеристики фильтрационных потоков – напоры, напорные градиенты, скорости и расходы потоков.

Рельеф района низкогорный с абсолютными отметками 400–600 м. Углы поверхностей склонов изменяются от 30° в прирусловых зонах речных долин до 5° в приводораздельных частях бассейнов. Отвечающие им градиенты уклонов находятся в пределах 0,1–0,6. Градиенты уклонов русел рек на участке укладываются в интервал 0,02–0,05. Отмеченные уклоны рельефа определяют граничные значения гидравлических уклонов трещинных грунтовых фильтрационных потоков в соответствующих структурных элементах. В области питания и транзита гидравлические уклоны не могут быть больше уклонов водоразделов и склонов, в области разгрузки градиенты потоков не могут быть меньше уклонов дренирующих русел рек.

Климат исследуемого района резко континентальный, среднегодовая температура воздуха 3 °С, около 5 месяцев температура не поднимается выше 0 °С (конец ноября – начало апреля). В этот период подземные воды не получают инфильтрационного питания. Атмосферные осадки (данные по ним, испарению и стоку взяты с «Карт основных элементов водного баланса...» [15]) в пределах 500–600 мм, среднемноголетняя величина испарения с поверхности суши 400–420 мм. Основная доля испарения – в летнее время, поэтому и в этот период роль инфильтрационного питания грунтовых вод незначительна. Среднемноголетняя величина водного стока малых рек района составляет 140–150 мм, доля в нем подземного стока 60–70 мм. Климатические особенности формирования общего водного баланса определяют характер годового режима уровней грунтовых вод района (рис. 1).

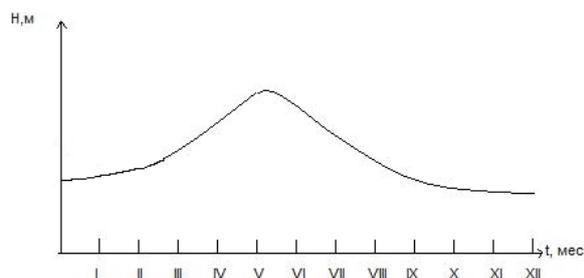


Рис. 1. Типовой график колебания уровня грунтовых вод в наблюдательных скважинах в годовом цикле для климатических условий региона [15]

Fig. 1. Typical curve of groundwater level fluctuation in observation wells in annual cycle for climatic conditions of the region

В учении о режиме подземных вод [4, 16, 17] обоснована закономерность: типовой график уровня колебательного спектра является общим (эталонным) для всей территории природной провинции и отражает однотипное влияние климатических режимообразующих факторов на колебательный режим. На основе этой закономерности сформулируем второе положение (постулат), на котором базируется методика: *гидрогеодинамический режим уровней подземных вод ни в годовом, ни в многолетних циклах колебаний не влияет на пространственную структуру фильтрационных потоков, изменяя только его количественные характеристики в пределах выделенных морфоструктурных элементов.*

Исходный материал, характеристика участка. Участок водозабора подземных вод горнорудного предприятия, для которого нами построена модель морфоструктуры рельефа и крупномасштабная карта гидроизогипс (рис. 2), находится на правобережном склоне бассейна р. Волчовки. Площадь участка в обозначенных границах около 0,23 км². В качестве модели рельефа при построении карты используется топооснова 1:2000 масштаба. Специальные топографические работы для предприятия выполнены в 2009 г. на значительно большей территории, включающей все его объекты.

Водозабор (одиночная скважина в центре участка, рис. 2) морфологически приурочен к основанию горного склона вблизи долины р. Волчовки. Расстояние до речки 50 м. Высшая водораздельная отметка бассейна речки 625 м расположена в 1200 м к северо-востоку от скважины. Абсолютные отметки русла речки изменяются на участке от 466 до 472 м. Отметка устья водозаборной скважины 478,27 м. Общая площадь правобережной части бассейна стока р. Волчовки равна около 2,5 км². Вероятная водосборная площадь водозабора при формировании депрессионной воронки 0,66 км². На этой площади формируются эксплуатационные запасы водозабора за счет естественных ресурсов подземных вод.

Местоположение водозаборной скважины обосновано результатами специальных поисково-разведочных работ, выполненных для горнорудного

предприятия в 2009 г. Работы включали: дешифрирование аэрофотоснимков масштаба 1:30000; маршрутное гидрогеологическое обследование; геофизические работы для оценки трещиноватости по характеру неоднородности магнитного поля. На основе предыдущего задано и пробурено две поисково-разведочные скважины глубиной 35 м. По результатам опытно-фильтрационных работ лучшая по производительности скважина была разбурена как разведочно-эксплуатационная и в дальнейшем оборудована в качестве водозаборной (рис. 2). Вторая скважина находится за пределами поля карты на юго-запад от водозаборной в 164 м.

Составители: А. А. Лимарева,
А. А. Лукин, 2010 год

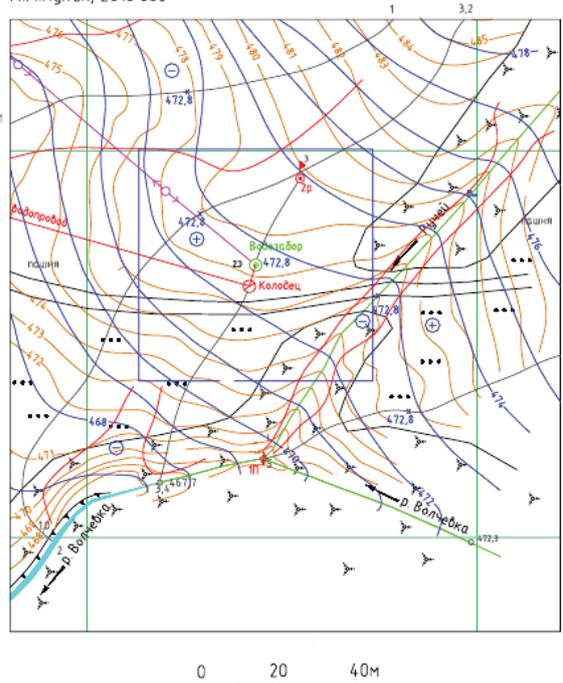


Рис. 2. Модель морфоструктуры рельефа и карта гидроизогипс участка водозаборной скважины горнорудного предприятия (пояснения в тексте)

Fig. 2. Model of a relief morphostructure and depth-to-water map of the area of mining enterprise water well (explanation is in the text)

Геологическое и гидрогеологическое строение юго-западного склона в пределах участка карты характеризует геолого-технический разрез эксплуатационной скважины (рис. 3). По выделенным и задокументированным при бурении слоям и горизонтам его можно принимать как типовой разрез горного склона. Меняются только мощности рыхлых образований в зависимости от строения морфологических элементов структуры поверхности склона и особенностей трещиноватости гранитов. Разрез по данным бурения двух скважин характеризуется следующей последовательностью залегания горизонтов, составом пород и пределами в изменении мощностей (в скобках – номера слоев, показанных на рис. 3): сверху, под почвенным сло-

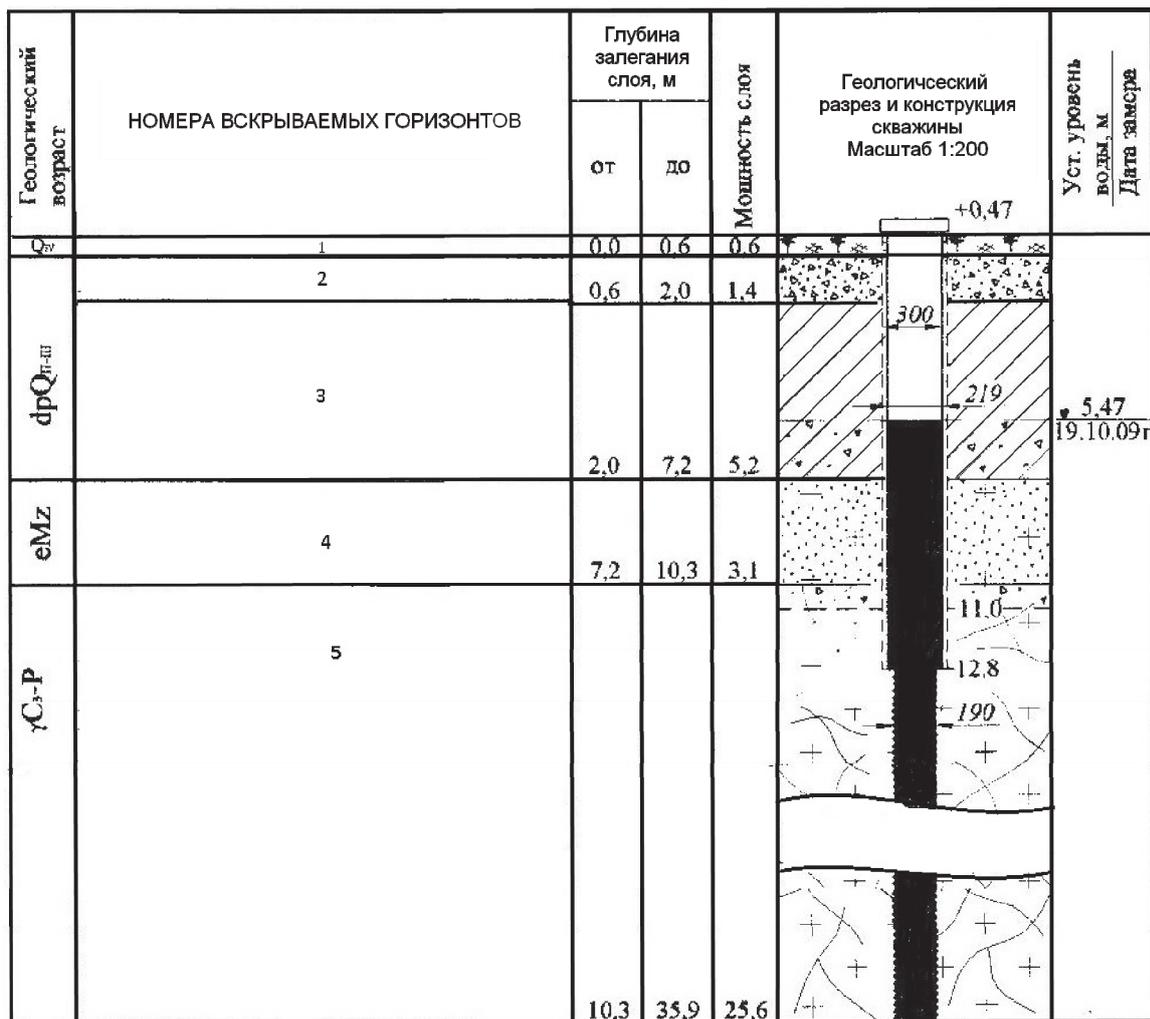


Рис. 3. Геолого-технический разрез эксплуатационной скважины (литологическое описание горизонтов дается в тексте)

Fig. 3. Geological and technical section of the production well (lithological description of horizons is introduced in the text)

ем (1), залегают щебенисто-песчаные с супесчаным заполнителем делювиально-пролювильные отложения до 2 м толщиной (2); ниже (3) макропористые суглинки с дресвой и щебнем мощностью 3,5–5,2 м; далее (4) вскрываются элювиальные образования по гранитам мощностью 1–3,1 м (песок желтовато-серый средней крупности со структурой гранитов); ниже элювия до забоя скважин (5) – трещиноватые граниты.

В эксплуатационной скважине проведена опытная откачка при двух понижениях. При понижении $S=13,55$ м (47 часов) получен расход $Q=3,6$ дм³/с, при втором понижении 9,68 м (48 часов) – 2,6 дм³/с. График $Q(S)$ имеет прямолинейную зависимость, отражая напорный характер водоносного горизонта. То есть водоносный горизонт в зоне трещиноватости выветривания гранитов, который по условиям залегания может быть отнесен только к грунтовому типу, из-за строения верхней рыхлой части разреза (рис. 3) и структуры потока в нижней части горного склона долины, приобретает здесь местные гидростатические напоры на кровлю.

Скважина с большим резервом обеспечивает заявленную потребность в воде (30 м³/сут= $0,35$ дм³/с).

Итак, участок составления карты гидроизогипс характеризует фильтрационный поток в грунтовом водоносном горизонте, представленном трещиноватыми гранитами в зоне их выветривания. Структура потока отражает условия в нижней части горного склона долины р. Волчовки. В системе классического разделения горизонтов на области питания, транзита и разгрузки – это область транзита и начинающейся частичной разгрузки подземных вод горизонта, где он приобретает черты напорного. Информация по уровням (напорам) фильтрационного потока ограничивается одной скважиной и отметками уреза воды в р. Волчовка, как отметками грунтового потока подземных вод в области их полного дренирования речкой. Исходя из данных рис. 3, отметка установившегося уровня воды в скважине принимается 472,8 м. При таком объеме исходной информации по уровням оказывается невозможным использование как традиционной методики, так и компьютерных техноло-

гий построения карт гидроизогипс. Разрабатываемая морфоструктурно-гидрогеодинамическая методика позволяет построить прогнозную карту гидроизогипс на основе имеющейся минимальной информации. В качестве основы такой карты выступает морфоструктурная (морфолгическая) модель рельефа. Она строится с использованием топографической карты 1:2000 масштаба, которая является неотъемлемой информационной базой методики.

Методика построения карты гидроизогипс базируется на ряде положений, постулирующих обусловленность отражения структурных элементов морфологии рельефа как причины в структурных элементах фильтрационного потока как следствия.

Исходные положения методики

Методика основана на следующих положениях (постулатах) морфоструктурно- гидрогеологического анализа [2].

1. Поверхность зеркала грунтовых вод, как правило, находится ниже земной поверхности и совпадает с последней в ландшафтно-морфологических элементах низинных болот, русел ручьев и рек, поверхностных водоемов.
2. Структура фильтрационного потока грунтового водоносного горизонта полностью контролируется морфологической структурой рельефа. Гидродинамическая структура фильтрационного потока, заданная в определенном масштабе картой гидроизогипс, подробно отражает (как следствие причину) морфологическую структуру рельефа, заданную или горизонталями топографической карты того же масштаба, или изогипсами структурных поверхностей рельефа (например, базисных обоснованного порядка) [13].
3. Горизонтальные проекции гребневых (водораздельных) и килевых (талвеговых) линий морфологической структуры рельефа и поверхности «зеркала» грунтовых вод совпадают. Для постоянно функционирующих водотоков линии урезов их русел и килевые линии поверхности зеркала грунтовых вод совпадают также в вертикальной проекционной плоскости.
4. Горизонтальные проекции линейных границ площадных форм по знаку кривизны поверхности модели морфоструктуры рельефа или его структурных поверхностей и подобных им форм поверхности зеркала грунтовых вод также совпадают.
5. Гидравлические уклоны потоков грунтовых вод, как правило, меньше уклонов поверхности рельефа и совпадают с последними в дне речных долин, где в отмеченных ландшафтно-морфологических элементах происходит слияние этих поверхностей, и близки с ними в зонах водораздельных линий рельефа. Природа гидравлических грунтовых потоков не допускает уклонов больших, чем уклоны поверхностей рельефа, под которыми находится грунтовый водоносный горизонт.
6. Гребневые (водораздельные) линии модели морфоструктуры рельефа определяют плановое положение линейного источника (питания) грунтового потока; тальвеговые (русловые урезы) линии – положение линейного стока (дренирования, полной разгрузки) грунтового потока.
7. Если поверхности зеркала грунтовых вод и рельефа по гребневым и килевым линиям не совпадают по высоте, то глубина уровня грунтовых вод будет меньше в «талвеговой» плоскости вертикального сечения, чем в сопряженной с ней «водораздельной».

Правила реализации положений в методике построения карты гидроизогипс

На основе приведенных исходных положений методика построения карты гидроизогипс включает следующие правила и последовательность их применения:

1. На топографической карте по рисунку горизонталей рельефа проводятся основные водораздельные (гребневые) и тальвеговые (килевые) линии. На рис. 2 они обозначены цифрами на концах: две килевые (1–1, 4–4) и три гребневые (2–2, 3–3, 5–5).
2. В горизонталях рельефа находятся точки перегиба, разделяющие их на отрезки, противоположные по знаку кривизны. Последовательно соединяя точки перегиба в соседних горизонталях, получаем линейные границы положительных (выпуклых) и отрицательных (вогнутых) морфоструктур в поверхности рельефа по ее «простирацию». На рис. 2 они разделяются штриховыми линиями и индексируются кружками со знаками «+» и «-». Выделенные по правилам 1 и 2 линии формируют линейный каркас модели морфоструктуры рельефа. Он задает и определяет плановую структуру фильтрационных потоков грунтового водоносного горизонта, разделяя их на два типа: расходящиеся и сходящиеся.
3. На гребневые и килевые линии сносится местоположение условных скважин, в которых уровень грунтовых вод прогнозируется на отметке уровня в водозаборной скважине (472,8 м). Если реальная скважина вскрывает водоносный горизонт между гребневой и килевой линиями (область транзита), то правило снесения (на основе седьмого положения): на килевые линии – на более низкие отметки, чем отметка устья скважины (478,3 м); на гребневые линии – совпадающие или более высокие отметки (рис. 2).
4. По выделенным линиям 1–1, ..., 5–5 в вертикальной плоскости, заданной осями Н–L (Н – высота, отметка горизонтали, которую пересекает линия; L – длина линии по сумме отрезков между горизонталями) строятся гипсометрические профили (рис. 4). Предыдущее правило проиллюстрировано на профилях в вертикальной проекции.

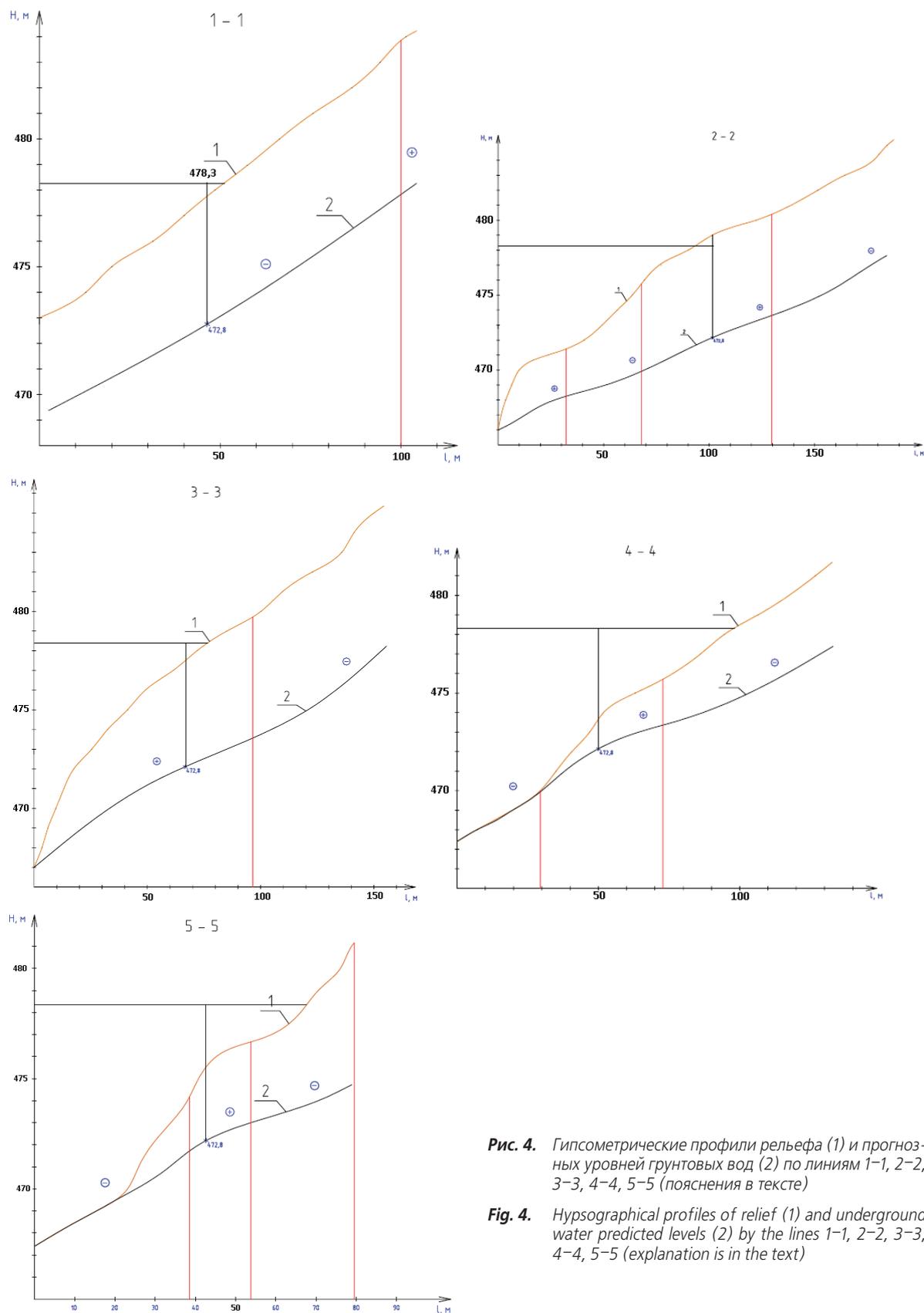


Рис. 4. Гипсометрические профили рельефа (1) и прогнозных уровней грунтовых вод (2) по линиям 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5 (пояснения в тексте)

Fig. 4. Hypsographical profiles of relief (1) and underground water predicted levels (2) by the lines 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5 (explanation is in the text)

5. На гипсометрических линиях профилей поверхности рельефа находятся определяющие точки перегиба, которые разделяют их на отрезки с положительной (выпуклой) и отрицательной (вогнутой) кривизной линии, которые обозначены знаками «+» и «-» в кружочках. Через эти точки проводятся ординатные вертикальные линии (рис. 4). Они являются геометрическим местом точек, разграничивающих на линии уровня грунтовых вод отрезки, подобные по знаку кривизны отрезкам на линии профиля рельефа. Это, согласно второму постулируемому положению, способ разделения профильной структуры фильтрационных потоков также на два типа – нисходящие и восходящие.
6. В координатах гипсометрических графиков $H(L)$ выносятся точки уровней грунтовых вод в условных скважинах с отметкой 472,8 м, по проекции и подобию соответствующие отметке уровня в эксплуатационной скважине.
7. На гипсометрических графиках проводятся прогнозные линии уровней грунтовых вод, отражающие формы линий рельефа по кривизне (точки перегиба должны находиться на выделенных ординатных линиях), то есть вычерчиваются линии уровней, субпараллельные линиям рельефа с несколько меньшими уклонами. Обязательность выполнения двух положений – подобия (второе) и меньших уклонов (пятое) – иногда требует смещения условной скважины по оси L .
8. Точки на линиях уровней грунтовых вод (рис. 4) с отметками гидроизопъез строящейся карты переносятся на соответствующие гребневые и килевые линии топоосновы (рис. 2) и оцифровываются значениями отметок.
9. Через одновысотные точки последовательно проводятся линии гидроизогипс, соблюдая правило подобия (согласно постулируемым положениям 2 и 4) знака их кривизны знаку кривизны горизонталей в границах выделенных положительных и отрицательных элементов морфоструктуры рельефа (правило 2 методики).
10. Каждая новая скважина, вскрывшая водоносный горизонт с высотной привязкой установившегося уровня подземных вод, встраивается по приведенным правилам методики в структурную модель рельефа, не изменяя плановых границ ее структурных элементов. Меняется (уточняется) только высотное положение гребневых и килевых линий на гипсометрических профилях соответствующих структурных линий рельефа.

Общая оценка достоверности построенной карты

Построенная карта по своему информационно-му и содержательному наполнению является прогнозной. Оценку ее достоверности можно дать в двух отношениях: 1) природная объективность и достоверность выделенных структурных элементов фильтрационных потоков согласно их понима-

нию и определению; 2) точность полученных на карте характеристик потока (значений напоров и напорных градиентов) в его площадных структурных элементах.

1. Методика построения карты базируется на положениях, постулирующих обусловленность структурной организации фильтрационных потоков водоносных горизонтов как следствия и морфоструктурой рельефа как причины. Эти постулаты не противоречат известным взаимосвязям и закономерностям, выявленным в инженерной, региональной и общей гидрогеологии, геоморфологии, неотектонике и четвертичной геологии. В методике используется однотипный подход к структурированию как земной поверхности (рельефа), так и поверхности напорного поля фильтрационных потоков. Отражением взаимодействия этих систем в их причинной связи является структурное подобие выделяемых в них элементов. В методике построения карт гидроизогипс это отражение определяется критерием геометрического подобия знаков кривизны поверхностей напорного поля и рельефа. Достоверность же выделения структурных элементов фильтрационных потоков на карте гидроизогипс определяется только достоверностью исходной топографической основы, точностью и достоверностью показанных на ней форм земной поверхности и, соответственно, адекватностью отражения в морфологической модели рельефа. Основное условие тождественности отражения – соответствие масштаба карты гидроизогипс масштабу топографической основы по нормативным требованиям. В нашем случае при построении карты гидроизогипс 1:2000 масштаба использована топооснова того же масштаба. Таким образом, построенная карта гидроизогипс объективно и достоверно отражает структуру фильтрационного потока в формах напорной поверхности водоносного горизонта.
2. О точности значений характеристик фильтрационного потока, отраженных на карте. Предельно малый объем исходной информации по уровням подземных вод (одна скважина), который используется при построении карты, является источником ошибок числовых значений напоров и напорных градиентов, характеризующих любую точку карты. По природным взаимосвязям карта верно отражает пространственное положение главных элементов структуры потоков – линейных источников и стоков, связанных с гребневыми и килевыми линиями рельефа. Последние определяют граничные значения градиентов напоров в вертикальных сечениях этих линий, больше или меньше которых «запрещает» природа взаимодействия этих систем. Поэтому и значения напорных градиентов на площади карты между гребневыми и килевыми линиями уровенной поверхности не могут значительно отличаться от истинных.

Назначение карт, примеры использования

Отметим два направления использования карт гидроизогипс и гидроизопъез, построенных по морфоструктурно-гидрогеодинамической методике: 1) обоснование программ и проектов гидрогеоэкологического мониторинга водозаборов подземных вод и других горнотехнических систем; 2) решение прямых гидрогеодинамических и гидрогеофизических задач.

1. Основные задачи гидрогеоэкологического мониторинга водозаборов связаны с контролем и прогнозом изменения количества и качества подземных вод при их эксплуатации. Эффективность решения этих задач определяется правильно размещенной наблюдательной сетью за подземными и поверхностными водами. Первоосновой проектирования и размещения наблюдательной сети локального (производственного) мониторинга водозаборов являются карты гидроизогипс и гидроизопъез эксплуатируемых горизонтов, отражающих природную структуру фильтрационных потоков и условия развития депрессионных воронок [18]. Использование приведенной на рис. 2 карты как основы при обосновании размещения наблюдательной сети в зоне санитарной охраны водозабора горнорудного предприятия описано в наших работах [19, 20].

2. Главные гидрогеодинамические и гидрогеофизические задачи, решаемые с использованием карт гидроизогипс и гидроизопъез, построенных по новой методике, связаны с оценками пространственной (волновой) структуры основных характеристик водного баланса водоносных горизонтов. При этом открываются новые перспективы решения двух важных проблем: проблемы водообмена и проблемы предельных границ распространения вредных компонентов от источников загрязнения разнообразного происхождения, контролируемых границами природных водообменных систем.

Подход к решению задач по обоим проблемам базируется на использовании в качестве расчетной схемы гидродинамической сетки планового фильтрационного потока (условное разделительное название – плановая сетка). Исходная основа сетки – масштабная геометрическая модель напорного поля горизонта, отраженная картой гидроизогипс или гидроизопъез. Градиентные линии поля, ограничивающие ленты тока и оформляющие сетку, проводятся перпендикулярно к изолиниям напоров с некоторой заданной равномерностью. Для плановых сеток боковые границы лент тока в горизонте являются «непроницаемыми» и относятся ко второму роду граничных условий, а границы на поверхностях кровли и подошвы – к граничным условиям третьего рода и описываются расходом или модулем перетекания через разделяющие водоупоры. В связи с этим в лентах плановых сеток расход потока закономерен, в соответствии с выделенными (согласно волновой модели) элементами

структуры потока, увеличивается или уменьшается от отсека к отсеку [2].

Открываются новые возможности решения многообразных воднобалансовых задач. Теоретически, методически и практически перспективна гидрогеофизическая постановка и решение этих задач. Она предполагает выявление и изучение волновой структуры элементов водного баланса в пространстве и времени в единстве латерального (пластового) и вертикального (межпластового) типов водообмена, а также количественную отдельную оценку периодов и частот водообмена этих двух типов.

Решение задач водного баланса и водообмена на основе плановой гидродинамической сетки напорного поля, типизированного элементами структуры ортогональной волновой модели, дано в общем виде на уровне логики элементарной математики в работе [2]. В нашей же работе [21] впервые, на основе введенного воднобалансового коэффициента остаточного загрязнения (изменяется от 1 до 0), обоснованы предельные границы распространения жидких промышленных отходов от полигона захоронения. Эти границы обусловлены природной структурой фильтрационных потоков, определяемых ею водообменными системами и водным балансом горизонта.

Итак, карты гидроизогипс и гидроизопъез, построенные по новой морфоструктурно-гидрогеодинамической методике, позволяют более эффективно и достоверно решать ключевые задачи геоэкологии при эксплуатации горнотехнических систем. Новые методические возможности карт определяются достоверностью отражения на них структуры фильтрационных потоков даже при минимальном объеме исходной информации по напорам подземных вод.

Заключение

Определим отличия и дадим сравнительную оценку двух методик составления карт гидроизогипс: разрабатываемой морфоструктурно-гидрогеодинамической и используемыми в настоящее время, в том числе в компьютерных технологиях (далее коротко – разрабатываемая и принятые методики).

1. Главное различие методик – их модельное содержание, или основа. Разрабатываемая базируется на детерминированной модели обусловленности структуры фильтрационного потока морфоструктурой рельефа, принятые – на вероятностных моделях распределения напоров в точках наблюдения.
2. В разрабатываемой методике положение линейных и площадных элементов структуры фильтрационных потоков, выраженных в напорном поле, задаются неизменными в пространстве и времени моделью морфоструктуры рельефа, в принятых это положение является неопределенным.
3. Отмеченные различия определяют разделение гидрогеодинамических и гидрогеофизических

- задач по определенности их решения на основе карт гидроизогипс. Карты, построенные по разрабатываемой методике, решают прямые задачи, по принятой – только обратные.
4. В разрабатываемой методике каждое новое значение напора водоносного горизонта в скважине по описанным правилам встраивается в модель без нарушения пространственной структуры фильтрационных потоков, расположения источников и стоков (областей питания и разгрузки). В принятых методиках каждая новая скважина изменяет как характеристики поля, так и его структуру, но только в окрестности скважины, не затрагивая остальную площадь карты.
 5. Различны требования к объему исходной информации, удовлетворяющему тем или иным нормативам точности. При построении карты по разрабатываемой методике точность отражения структуры фильтрационного потока и пространственного распределения характеристик его напорного поля определяется конечным и незначительным числом скважин. Для получения такой же точности карт с построением по принятым методикам требуется объем исходной информации в разы больший.
 6. Следующее различие связано с предыдущим и определяется разными принципами при обосновании размещения скважин. Основной принцип обоснования места расположения и числа скважин при использовании первой методики – характерные точки линейных элементов структуры морфологии рельефа, для принятой методики наиболее эффективна равномерная сетка.
 7. И последнее различие. Карты гидроизогипс и гидроизопьез, построенные по разрабатываемой методике, достоверно и картографически определены прогнозируют границы областей питания и разгрузки водоносного горизонта. Это определяется детерминированной, по природе взаимодействия – объективной, обусловленностью структурной организации фильтрационных потоков морфоструктурой рельефа. Прогнозные возможности традиционно полученных карт гидроизогипс и гидроизопьез имеют вероятностный характер, а уровень вероятности определяется объемом исходной информации по напорам – плотностью и равномерностью точек наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практикум по гидрогеологии / И.К. Гавич, Л.В. Жемерикина, А.М. Крысенко, Д.М. Чумакова. – М.: Недра, 1995. – 253 с.
2. Лукин А.А. Опыт разработки методики морфоструктурно-гидрогеологического анализа. – Новосибирск: Наука, 1987. – 112 с.
3. Огильви Н.А. Физические и геологические поля в гидрогеологии. – М.: Наука, 1974. – 160 с.
4. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / И.К. Гавич, В.С. Ковалевский, Л.С. Язвин и др. – Новосибирск: Наука, 1983. – 240 с.
5. Хмелевской В.К., Костицын В.И. Основы геофизических методов. – Пермь: Перм. ун-т, 2010. – 400 с.
6. Каменский Г.Н., Гавич И.К., Семенова С.М. Гидродинамическая характеристика различных видов потоков подземных вод // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1960. – № 10. – С. 81–88.
7. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 328 с.
8. Герасимов И.П. Опыт геоморфологической интерпретации общей схемы геологического строения СССР // Проблемы физической географии. Т. 12. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1946. – С. 33–46.
9. Мещеряков Ю.А. Структурная геоморфология равнинных стран. – М.: Наука, 1965. – 390 с.
10. Уфимцев Г.Ф., Онухов Ф.С., Тимофеев Д.А. Терминология структурной геоморфологии и неотектоники. – М.: Наука, 1979. – 256 с.
11. Ласточкин А.Н. Морфодинвмическая концепция общей геоморфологии. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1991. – 220 с.
12. Морфология рельефа / Г.Ф. Уфимцев, Д.А. Тимофеев, Ю.Г. Симонов и др. – М.: Научный мир, 2004. – 184 с.
13. Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. – Саратов: Изд-во Саратовского гос. ун-та, 1960. – 94 с.
14. Кирюхин В.А. Региональная гидрогеология. – СПб.: Изд-во СПб ГГИ (ТУ), 2005. – 344 с.
15. Карты основных элементов водного баланса и водных ресурсов СССР / науч. ред. И.С. Зекцер, О.В. Попов. – М.: ГУГК, 1982.
16. Коноплянцев А.А., Ковалевский В.С., Семенов С.М. Естественный режим подземных вод и его закономерности. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 231 с.
17. Коноплянцев А.А., Семенов С.М. Изучение, прогноз и картирование режима подземных вод. – М.: Недра, 1979. – 193 с.
18. Экологическая гидрогеология / А.П. Белоусова, И.К. Гавич, А.Б. Лисенков, Е.В. Попов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 397 с.
19. Лимарева А.А., Лукин А.А. Мониторинг подземных вод хозяйственно питьевого водозабора. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 92 p.
20. Лукин А.А., Лимарева А.А. Крупномасштабное картографирование структуры фильтрационного потока грунтового водоносного горизонта на участке водозабора подземных вод ГРП Секисовское (Республика Казахстан) и обоснование системы мониторинга // Питьевые подземные воды. Изучение, использование и информационные технологии. – Московская область: ВСЕГИНГЕО, 2011. – С. 37–41.
21. Воднобалансовая оценка безопасности подземного захоронения жидких радиоактивных отходов / А.А. Лукин, М.Б. Букаты, Ал.Ан. Лукин, Е.В. Шмурыгина, А.А. Зубков, В.В. Данилов // Подземные воды востока России: Матер. Всерос. совещания по подземным водам востока России. – Тюмень: Тюменский дом печати, 2009. – С. 395–398.

Поступила 30.06.2014 г.

UDC 504.064.2.001.18

RELIEF MORPHOSTRUCTURE MODELS METHOD OF BUILDING LARGE-SCALE MAP OF HYDROISOHYPSES

Anatoly A. Lukin,
Cand. Sc.

Alexei A. Lukin,
Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lukin@tpu.ru

Anna A. Limoreva,
OILTIM Ecoservice, 3, Televizionny pereulok,
634003, Tomsk, Russia. E-mail: anuta-lim@mail.ru

The main aim of the research is to develop the hydro-morphostructural method of constructing large-scale depth-to-water maps of aquifer. This method allows developing the maps providing the limited background information on groundwater levels in wells. The paper introduces a new approach to map developing based on a deterministic model of controlling pressure field aquifers – the model of relief morphostructure. All existing methods and technologies apply probabilistic models of pressure distribution in mapping hydroisohyps. The paper introduces: statement of the research subject and the problem to be solved by the development technique; adopted content of basic concepts; brief description of hydrogeological conditions of the object; points of morphostructural-hydrogeological analysis; rules for implementing the provisions in the method of constructing large-scale predictive depth-to-water maps; depth-to-water map generated on the basis of relief morphological structure model for the area of groundwater mining enterprise and evaluation of its accuracy; comparative evaluations of two methods of mapping – the developed and adopted ones. The main difference of the methods is their modeling content, or foundation. The developed technique is based on a deterministic model of filtration flow structure dependence on relief morphostructure. The adopted technique is based on probabilistic models of pressure distribution at the observation points. In the development method the position of linear and areal elements of filtration flow structure which are prominent in the pressure field are given permanent in space and time by the model of relief morphostructure. In the adopted ones this position is uncertain. The requirements are different for the scope of the initial information satisfying some standards of accuracy. When constructing the map by the development method the precision in reflecting the filtration flow structure and spatial distribution of characteristics of its pressure field is determined by the finite and small number of wells. To obtain the same accuracy of the maps with construction according to the accepted procedures one requires greater amount of initial information.

Key words:

Ground aquifer, map of hydroisohyps, morphostructure hydrodynamic technique, filtration flow structure, relief morphostructure, flow pattern deformation, orthogonal wave model, direct and inverse hydrogeophysical problems.

REFERENCES

- Gavich I.K., Zhemerikina L.V., Krysenko A.M., Chumakova D.M. *Praktikum po gidrogeologii* [Hydrogeology practicum]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 253 p.
- Lukin A.A. *Opyt razrabotki metodiki morfostrukturno-gidrogeologicheskogo analiza* [Experience in developing techniques of morphostructural-hydrogeological analysis]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 112 p.
- Ogilvi N.A. *Fizicheskie i geologicheskie polya v gidrogeologii* [Physical and geological field in hydrogeology]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 160 p.
- Gavich I.K., Kovalevsky V.S., Yazvin L.S. *Osnovy gidrogeologii. Gidrogeodinamika* [Basics of hydrogeology. Hydrodynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 240 p.
- Khmelevskoy V.K., Kostitsyn V.I. *Osnovy geofizicheskikh metodov* [Fundamentals of geophysical methods]. Perm, Perm University Press, 2010. 400 p.
- Kamensky G.N., Gavich I.K., Semenova S.M. *Gidrodinamicheskaya kharakteristika razlichnykh vidov potokov podzemnykh vod* [Hydrodynamic characteristics of different types of groundwater flows]. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*, 1960, no. 10, pp. 81–88.
- Shestakov V.M. *Dinamika podzemnykh vod* [The dynamics of groundwater]. Moscow, MGU Press, 1973. 328 p.
- Gerasimov I.P. *Opyt geomorfologicheskoy interpretatsii obshchey skhemy geologicheskogo stroeniya SSSR* [Experience in geomorphological interpretation of general scheme of the USSR geological structure]. *Problemy fizicheskoy geografii* [Issues of physical geography]. Moscow; Leningrad, USSR AS Press, 1946. Vol. 12, pp. 33–46.
- Meshcheryakov Yu.A. *Strukturnaya geomorfologiya ravninnykh stran* [Structural geomorphology of lowland countries]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 390 p.
- Ufimtsev G.F., Onukhov F.S., Timofeev D.A. *Terminologiya strukturnoy geomorfologii i neotektoniki* [Terminology of structural geomorphology and neotectonics]. Moscow, Nauka publ., 1979. 256 p.
- Lastochkin A.N. *Morfodinamicheskaya kontseptsiya obshchey geomorfologii* [Morphodynamic concept of general geomorphology]. St-Petersburg, Leningrad University Press, 1991. 220 p.
- Ufimtsev G.F., Timofeev D.A., Simonov Yu.G. *Morfologiya relefa* [Relief morphology]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2004. 184 p.
- Filosofov V.P. *Kratkoe rukovodstvo po morfometricheskomu metodu poiskov tektonicheskikh struktur* [Quick Guide in morphometric methods to search for tectonic structures]. Saratov, Saratov State University Press, 1960. 94 p.
- Kiryukhin V.A. *Regionalnaya gidrogeologiya* [Regional hydrogeology]. St-Petersburg, St-Petersburg GGI (TU) Press, 2005. 344 p.
- Karty osnovnykh elementov vodnogo balansa i vodnykh resursov SSSR* [Maps of the main elements of water balance and water resources of the USSR]. Eds. I.S. Zektser, O.V. Popov. Moscow, GUGK Publ., 1982.
- Konoplyantsev A.A., Kovalevsky V.S., Semenov S.M. *Estestvennyy rezhim podzemnykh vod i ego zakonmernosti* [Natural

- groundwater regime and its laws]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1963. 231 p.
17. Konoplyantsev A.A., Semenov S.M. *Izuchenie, prognoz i kartirovanie rezhima podzemnykh vod* [Forecast and mapping of groundwater regime]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 193 p.
 18. Belousova A.P., Gavich I.K., Lisenkov A.B., Popov E.V. *Ekologicheskaya gidrogeologiya* [Environmental Hydrogeology]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007. 397 p.
 19. Limareva A.A., Lukin A.A. *Monitoring podzemnykh vod khozyajstvenno pitevogo vodozabora* [Monitoring of groundwater in domestic drinking water intake]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 92 p.
 20. Lukin A.A., Limareva A.A. Krupnomasshtabnoe kartografirovaniye struktury filtratsionnogo potoka gruntovogo vodonosnogo gorizonta na uchastke vodozabora podzemnykh vod GRP Sekisovskoe (Respublika Kazakhstan) i obosnovaniye sistemy monitoring [Large-scale mapping of ground aquifer filtration flow structure at the site of groundwater intake Sekisovskoe (Kazakhstan) and substantiation of the monitoring system]. *Pitevye podzemnye vody. Izuchenie, ispolzovanie i informatsionnye tekhnologii* [Drinking groundwaters. Investigation, use and information techniques]. Moscow region, VSEGINGEO Press, 2011. pp. 37–41.
 21. Lukin A.A., Bukaty M.B., Lukin Al.An., Shmurygina E.V., Zubkov A.A., Danilov V.V. Vodnobilansovaya otsenka bezopasnosti podzemnogo zakhroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov [The water balance assessment of safety of liquid radioactive waste underground disposal]. *Podzemnye vody vostoka Rossii. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam vostoka Rossii* [Groundwater of the East of Russia. Proc. of All-Russian meeting on groundwater of the East of Russia]. Tyumen, Tyumensky dom pechati, 2009. pp. 395–398.

Received: 30 June 2014.

УДК 621.039.572

ВЛИЯНИЕ ОТРАВЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВЫХ БЛОКОВ НА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Прозорова Ирина Валентиновна,

начальник группы лаборатории физики реакторных установок
Института атомной энергии НЯЦ РК, Казахстан, 711100,
г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10. E-mail: Prozorova@nnc.kz

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценить влияние отравления бериллиевых блоков на реактивность реактора, плотность потока тепловых нейтронов и распределение мощности реактора ИВГ.1М.

Цель работы: оценить влияние отравления бериллиевых блоков на нейтронно-физические характеристики реактора ИВГ.1М.

Методы исследования. Решение задачи состояло из двух частей: на первом этапе были выполнены нейтронно-физические расчеты скоростей реакции и плотности потока нейтронов с помощью программы MCNP5. На втором этапе для решения систем с известными начальными величинами концентраций для бериллия, лития, трития и гелия была разработана программа на языке программирования Visual Basic в среде Excel.

Результаты. Представлены результаты нейтронно-физических расчетов активной зоны реактора ИВГ.1М. с 1975 по 2013 гг. с учетом периодов пусков и простоев между пусками, и результаты по определению влияния отравления бериллия на реактивность. Результаты показывают, что периоды останова реактора сильно влияют на накопление гелия-3 в бериллиевых блоках, которое, в свою очередь, изменяет спектр нейтронов. Время останова не оказывает непосредственного влияния на концентрацию лития б. Основное накопление отравляющих веществ происходит не в периферийных зонах отражателя, а в бериллиевых межканальных вытеснителях, расположенных непосредственно около водоохлаждаемых каналов. Результаты расчетов могут быть использованы для оценки нейтронно-физических характеристик реактора в течении длительного времени. Расчетная модель с уточненными примесями материалов бериллиевых вытеснителей и отражателя может быть использована для получения более точных результатов при расчетах.

Ключевые слова:

Реактор ИВГ.1М, отравление, бериллий, скорость реакций, нейтронно-физические расчеты.

Повреждение бериллия в процессе его использования в ядерных реакторах происходит в результате протекания в нем двух первичных процессов: упругого взаимодействия нейтронов с ядрами и ядерных реакций. Облучение бериллия потоком нейтронов с энергией от 0,7 до 20 МэВ приводит к образованию изотопов лития (${}^6\text{Li}$), трития (${}^3\text{H}$) и гелия (${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$) в результате реакций (n, α) и $(n, 2n)$. Долговременное накопление газов гелия и трития производит эффект вздутия в бериллиевых блоках, а образовавшиеся ${}^3\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$, вызванные реакцией ${}^9\text{Be}(n, \alpha)$, имеют большое сечение поглощения. Эти процессы происходят и во время пусков, и во время простоев, и в конечном итоге влияют на характеристики реактора, внося отрицательные значения реактивности и изменения в распределение плотности потока тепловых нейтронов [1–13].

Объектом исследования являлись бериллиевые блоки вытеснителей и отражателей АЗ реактора ИВГ.1М [14, 15], графическое представление модели АЗ реактора приведены на рис. 1, 2. Расчетная модель построена с помощью программы MCNP5 [16], относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B-5,6 [17].

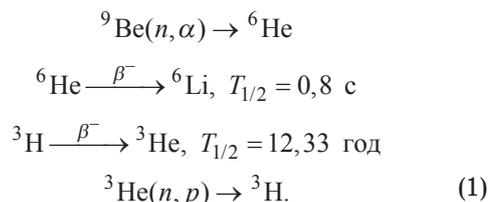
При подготовке расчетной модели учтены характерные особенности конструкции тепловыделяющей сборки водоохлаждаемого технологического канала (ВОТК), АЗ и органов регулирования, температурные режимы элементов конструкции реактора, включены программные опции, наилуч-

шим образом моделирующие процессы взаимодействия нейтронов с веществом. Основные особенности расчетной модели приведены ниже:

- тепловыделяющая сборка ВОТК, отражатели, вытеснители, регулирующие барабаны (РБ) и центральный экспериментальный канал (ЦЭК) заданы гетерогенной структурой;
- задано двухзонное профилирование тепловыделяющей сборки по радиусу;
- температура топлива и конструкционных элементов реактора принята равной 293 К;
- предусмотрена возможность изменения положения стержней системы, компенсирующей реактивность и изменения углового положения РБ от 0 градусов (поглощающие элементы направлены в сторону АЗ) до 180 градусов (поглощающие элементы направлены в противоположную сторону от АЗ). Вращение РБ осуществляется по часовой стрелке при виде сверху на реактор.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для нейтронов с энергией $E \geq 0,71$ МэВ [18] идет реакция (n, α) , которая приводит к серии реакций:



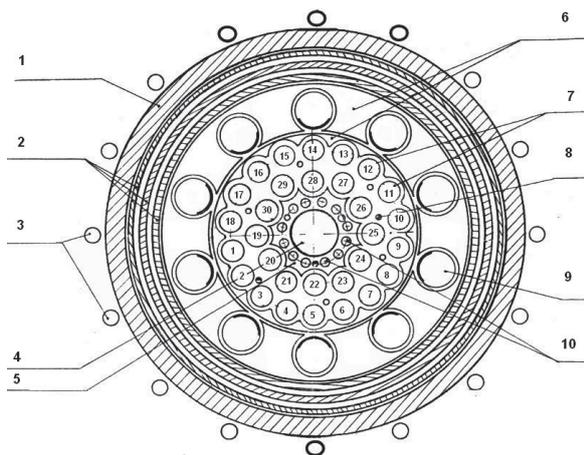


Рис. 1. Схема поперечного сечения реактора ИВГ.1М: 1) корпус; 2) боковые экраны; 3) ионизационные камеры; 4) центральная ампула; 5) центральный вытеснитель; 6) отражатель; 7) технологические каналы (ТК); 8) источник нейтронов; 9) регулирующие барабаны (РБ); 10) стержни компенсации реактивности (СКР)

Fig. 1. Scheme of cross section of the IVG.1M reactor: 1) body; 2) side walls; 3) ionization chamber; 4) central ampule; 5) central displacer; 6) reflector; 7) process channel; 8) neutron source; 9) control drums; 10) reactivity compensation rods

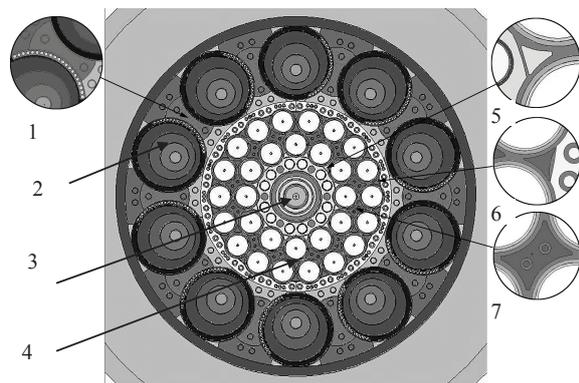


Рис. 2. Бериллиевые блоки в активной зоне реактора ИВГ.1М в расчетной модели: 1) отражатель; 2) регулирующие барабаны; 3) центральный вытеснитель; 4) боковой вытеснитель; 5) малые межканальные треугольные вытеснители; 6) межканальные треугольные вытеснители; 7) межканальные вытеснители

Fig. 2. Beryllium blocks of core of the IVG.1M reactor in the design model: 1) reflector; 2) control drums; 3) central displacer; 4) side displacer; 5) small interchannel triangle displacers; 6) interchannel triangle displacers; 7) interchannel displacers

Для нейтронов с энергией $E \geq 2,7$ МэВ [17] идет реакция $(n, 2n)$

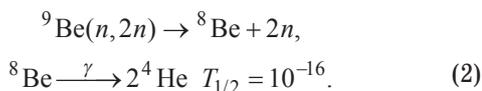


Схема цепочек реакций, происходящих при облучении бериллия, приведена на рис. 3.

Как видно из уравнения (1), некоторое количество бериллия почти сразу же превращается в ${}^6\text{Li}$. Концентрация бериллия, гелия, лития и трития определяется с использованием следующих уравнений [19–23]:

$$\frac{dN_{\text{Be}}}{dt} = -N_{\text{Be}} \cdot \{RR\}_{\text{Be}};$$

$$\frac{dN_{\text{L}}}{dt} = N_{\text{Be}} \cdot \{RR\}_{\text{Be}} - N_{\text{L}} \cdot \{RR\}_{\text{L}};$$

$$\frac{dN_{\text{T}}}{dt} = N_{\text{L}} \cdot \{RR\}_{\text{L}} - \lambda_{\text{T}} \cdot N_{\text{T}} + N_{\text{He}} \cdot \{RR\}_{\text{He}};$$

$$\frac{dN_{\text{He}}}{dt} = \lambda_{\text{T}} \cdot N_{\text{T}} - N_{\text{He}} \cdot \{RR\}_{\text{He}}, \quad (3)$$

где зависимость концентрации N_{Be} от времени не учитывалась для упрощения системы расчета. Подстрочные индексы Be, L, T и He соответствуют ${}^9\text{Be}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$. Постоянная λ_{T} является постоянной распада трития и равна $1,78 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. Скорость изотопной реакции $\{RR\}_x$: (n, T) для ${}^6\text{Li}$, (n, p) для ${}^3\text{He}$ и реакция (n, α) для бериллия определяется из следующего уравнения:

$$\{RR\}_x = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \varphi(E, t) \sigma_x(E) dE. \quad (4)$$

Энергетический интервал (E_{\min}, E_{\max}) охватывает полный диапазон энергий нейтронов, а $\sigma_x(E)$ является сечением для соответствующего изотопа x .

В случае, когда нейтронный поток $\varphi(E, t) = 0$ (перерыв в работе реактора), последние два уравнения системы (3) становятся нетривиальными и описывают распад трития и образование ${}^3\text{He}$.

Матрица коэффициентов системы (3) состоит из скоростей реакций изотопов и постоянной распада трития и имеет следующий вид

$$\begin{bmatrix} -\{RR\}_{\text{Be}} & 0 & 0 & 0 \\ +\{RR\}_{\text{Be}} & -\{RR\}_{\text{L}} & 0 & 0 \\ 0 & +\{RR\}_{\text{L}} & -\lambda_{\text{T}} & +\{RR\}_{\text{He}} \\ 0 & 0 & +\lambda_{\text{T}} & -\{RR\}_{\text{He}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Так как скорость реакции для бериллия зависит от величины нейтронного потока с энергией выше 0,7 МэВ, а скорости реакций для ${}^6\text{Li}$, ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ – от величины потока тепловых нейтронов, то концентрация гелия и трития сильно зависит от спектра нейтронов в бериллии. Учет изменения потока нейтронов в коэффициентах уравнения $\{RR\}$ делает задачу нелинейной. При проведении данного расчета было сделано допущение, что скорость реакции постоянна.

В уравнениях (3)–(5) не учитывается реакция ${}^9\text{Be}(n, 2n)$. Поэтому образование ${}^4\text{He}$ в результате этой реакции определяется отдельно. Для уравнения (2) образование ${}^4\text{He}$ решается следующей системой уравнений (6)

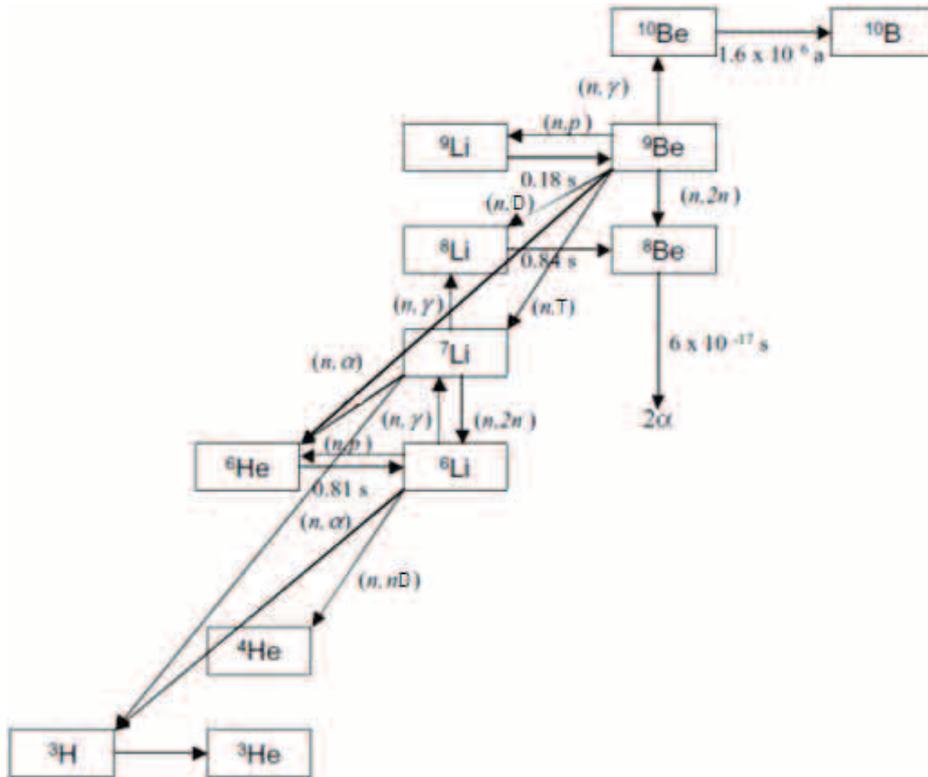


Рис. 3. Схема цепочек реакций, происходящих при облучении бериллия

Fig. 3. Scheme of chains of reactions occurring at beryllium radiation

$$\begin{aligned} \frac{dN_{\text{Be}}}{dt} &= -N_{\text{Be}} \{RR\}_{\text{Be}}, \\ \frac{dN_{\text{He}}}{dt} &= N_{\text{Be}} \{RR\}_{\text{Be}} - N_{\text{He}} \{RR\}_{\text{He}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Матрица коэффициентов системы (7) имеет следующую форму

$$\begin{bmatrix} -\{RR\}_{\text{Be}} & 0 \\ +\{RR\}_{\text{Be}} & -\{RR\}_{\text{He}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Решение задачи состояло из двух частей: на первом этапе были выполнены нейтронно-физические расчеты скоростей реакции и плотности потока нейтронов с помощью программы MCNP5; на втором этапе для решения систем 3 и 6 с известными начальными величинами концентраций для бериллия, лития, трития и гелия были использованы соотношения (8)–(10), была разработана программа на языке программирования Visual Basic в среде Excel [24].

$$\begin{aligned} N_{\text{L}}(t) &= N_{\text{L}}(0) \cdot \exp\{-RR_{\text{L}} \cdot t\} + \\ &+ \frac{A}{RR_{\text{L}}} \cdot (1 - \exp\{-RR_{\text{L}} \cdot t\}), \end{aligned} \quad (8)$$

где $A = N_{\text{Be}} \cdot RR_{\text{Be}}$, N_{Be} – константа.

Уравнения для расчета концентраций трития и гелия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} N_{\text{T}}(t) &= a_1 + a_2 \cdot \exp\{-(\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}}) \cdot t\} + \\ &+ \frac{A \cdot RR_{\text{He}}}{\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}}} \cdot t + \frac{(RR_{\text{He}} - RR_{\text{L}}) \cdot (N_{\text{L}}(0) - A / RR_{\text{L}})}{(RR_{\text{L}} - \lambda_{\text{T}} - RR_{\text{He}})} \times \\ &\times \exp\{-RR_{\text{L}} \cdot t\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{He}}(t) &= \frac{\lambda_{\text{T}}}{RR_{\text{He}}} \cdot a_1 - a_2 \cdot \exp\{-(\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}}) \cdot t\} + \\ &+ \frac{A \cdot \lambda_{\text{T}}}{\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}}} \cdot (t - 1 / RR_{\text{He}}) + \\ &+ \frac{\lambda_{\text{T}} \cdot (N_{\text{L}}(0) - A / RR_{\text{L}})}{(RR_{\text{L}} - \lambda_{\text{T}} - RR_{\text{He}})} \cdot \exp\{-RR_{\text{L}} \cdot t\}, \end{aligned} \quad (10)$$

где α_1 и α_2 – два дополнительных коэффициента:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{(1 + \lambda_{\text{T}} / RR_{\text{He}})} \times \\ &\times \left[N_{\text{L}}(0) + N_{\text{T}}(0) + N_{\text{He}}(0) - \frac{A}{RR_{\text{L}}} + \frac{(\lambda_{\text{T}} \cdot A / RR_{\text{He}})}{(\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}})} \right]; \\ a_2 &= \frac{1}{(1 + RR_{\text{He}} / \lambda_{\text{T}})} \times \\ &\times \left[\frac{RR_{\text{L}}}{(RR_{\text{L}} - \lambda_{\text{T}} - RR_{\text{He}})} \cdot (N_{\text{L}}(0) - A / RR_{\text{L}}) + N_{\text{T}}(0) - \right. \\ &\left. - \frac{RR_{\text{He}}}{\lambda_{\text{T}}} \cdot N_{\text{He}}(0) - \frac{A}{(\lambda_{\text{T}} + RR_{\text{He}})} \right]; \end{aligned}$$

N_{Be} – концентрация бериллия; $N_T(0)$ – концентрация трития в начальный момент времени; $N_{He}(0)$ – концентрация гелия в начальный момент времени; $N_L(0)$ – концентрация лития в начальный момент времени; $N_T(t)$ – концентрация трития в момент времени t ; $N_{He}(t)$ – концентрация гелия в момент времени t ; $N_L(t)$ – концентрация Li (лития) в момент времени t ; RR_L – скорость реакции для Li (лития); RR_{He} – скорость реакции для гелия; λ_T – постоянная распада трития.

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ГЕЛИЯ И ТРИТИЯ

Массовая доля бериллия в блоках составляет не менее 97,8 %. Массовая доля примесей в бериллии приведена в табл. 1.

Таблица 1. Массовая доля примесей в бериллии

Table 1. Impurity index in beryllium

Массовая доля примесей не более, % Impurity index is less than, %								
Fe	Al	Si	Cr	F	O	C	Ti	Сумма (Total) Mg, Mn, Ni, Cu
0,25	0,03	0,04	0,05	0,002	1,3	0,12	0,04	0,08

В качестве начальных условий принято, что литий, тритий и гелий имеют нулевую концентрацию $N_L(0)=N_T(0)=N_{He}(0)=0$, а концентрация бериллия соответствует технической характеристике бериллиевых образцов $N_{Be}(0)=0,1206003$ атом/барн·см. Для последующих периодов времени вычисленные концентрации, рассчитанные на конец текущего периода, использовались как начальные величины концентрации следующего периода.

Для оценки общего количества трития и гелия в бериллиевых блоках использовались сведения о работе реактора с 1975 по 2013 гг. Облучение проводилось с 07.03.1975 г. При проведении расчетов использовалась модель АЗ реактора ИВГ.1М с водяным теплоносителем.

Программа рассчитана на произвольное количество шагов. В каждом шаге точно определяется количество часов работы реактора, за которым сле-

Таблица 2. Скорость реакций в бериллиевых блоках

Table 2. Reaction rate in beryllium blocks

Элементы активной зоны Active zone elements	Скорость реакций RR, с ⁻¹ см ⁻³			
	Be	Li	⁴ He	³ He
Отражатель Reflector	1,28351·10 ⁻¹³	1,05114·10 ⁻⁸	2,75826·10 ⁻⁸	5,93592·10 ⁻⁸
Регулирующие барабаны Control drums	1,01014·10 ⁻¹³	7,61473·10 ⁻⁹	2,01145·10 ⁻⁸	4,30012·10 ⁻⁸
Центральный вытеснитель Central displacer	1,29476·10 ⁻¹²	1,35066·10 ⁻⁷	3,54822·10 ⁻⁷	7,62731·10 ⁻⁷
Боковой вытеснитель Side displacer	8,41708·10 ⁻¹³	8,20287·10 ⁻⁸	2,17644·10 ⁻⁷	4,63225·10 ⁻⁷
Малые межканальные треугольные вытеснители Small interchannel triangle displacers	1,89539·10 ⁻¹²	2,06592·10 ⁻⁷	5,57057·10 ⁻⁷	1,16665·10 ⁻⁶
Межканальные треугольные вытеснители Interchannel triangle displacers	1,45091·10 ⁻¹²	1,56001·10 ⁻⁷	4,22042·10 ⁻⁷	8,80953·10 ⁻⁷
Межканальные вытеснители Interchannel displacers	1,83924·10 ⁻¹²	1,97866·10 ⁻⁷	5,29051·10 ⁻⁷	1,11737·10 ⁻⁶

дуют часы простоя. Важно, что расчет изменения ядерной концентрации лития, трития и гелия проводился как во время работы реактора, так и во время простоев. Во время простоев реактора идут процессы распада трития ³H и наработки гелия ³He.

В табл. 2 приведены скорости реакций бериллия, лития, трития и гелия в блоках отражателя и вытеснителей, принятые при решении системы уравнений (3).

Для иллюстрации процессов, происходящих в реакторе, выбран один из малых межканальных вытеснителей (рис. 2), который подвергался сильному влиянию облучения. Все графики изменения концентрации построены для него.

Изменение ядерной концентрации лития и трития, имеющее место во время облучения бериллиевых блоков, представлено на рис. 4.

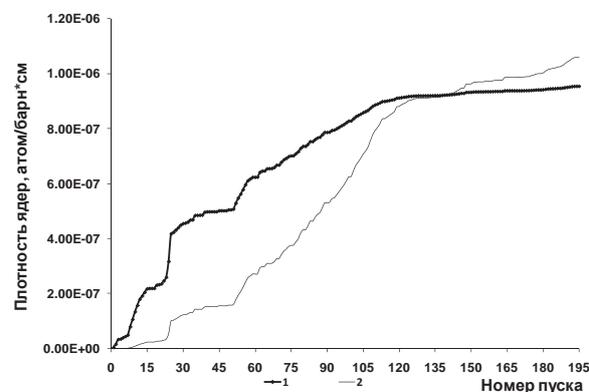


Рис. 4. Изменение ядерной концентрации лития и трития в течение длительной работы реактора без учета распада (1 – литий; 2 – тритий)

Fig. 4. Change of lithium and tritium nuclear concentration at long-term operation of the reactor without reference to decay (1 – lithium; 2 – tritium)

На рис. 5 представлено изменение ядерной концентрации наработанного ⁴He в течение длительной работы реактора.

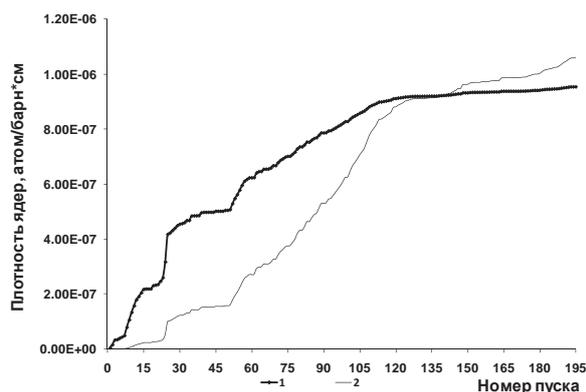


Рис. 5. Распределение ядерной концентрации ${}^4\text{He}$ в течение длительной работы реактора

Fig. 5. Distribution of ${}^4\text{He}$ nuclear concentration at long-term operation of the reactor

Из распределений, приведенных на рис. 4 и 5, видно, что плотность ядер в течение приблизительно первых 120 пусков резко возрастает, а затем рост снижается. Это связано с тем, что мощности и время проведения первых пусков были достаточно большими, по сравнению с последующими пусками.

На рис. 6 представлено изменение ядерной концентрации наработанного трития во время длительной работы реактора без учета распада (линия 1) и изменение ядерной концентрации с учетом распада трития в периоды простоя реактора (линия 2).

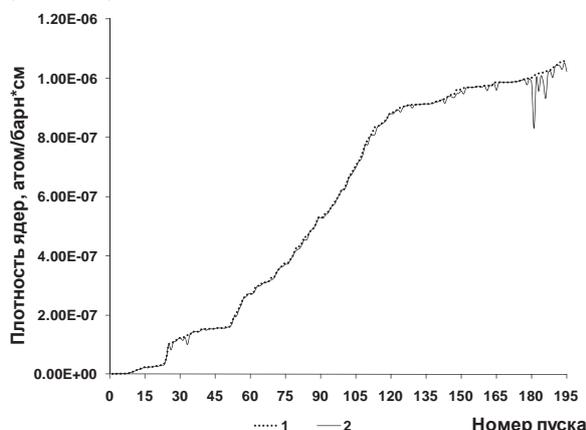


Рис. 6. Изменение ядерной концентрации ядер трития в течение длительной работы реактора: 1) с учетом; 2) без учета распада

Fig. 6. Change of tritium nuclear concentration at long-term operation of the reactor: 1) without; 2) with reference to decay

На рис. 7 представлено изменение ядерной концентрации наработанного ${}^3\text{He}$ во время длительной работы реактора без учета распада (линия 1) и изменение ядерной концентрации с учетом распада ${}^3\text{He}$ в периоды простоя реактора (линия 2).

Из распределений, представленных на рис. 6 и 7, видно, что учет распада трития и гелия в те-

чение длительной работы реактора влияет на изменение их ядерных концентраций. Видно, что на протяжении длительного останова реактора (в течение года) между 181 и 182 пусками количество ${}^3\text{He}$ увеличилось более чем на семь раз.

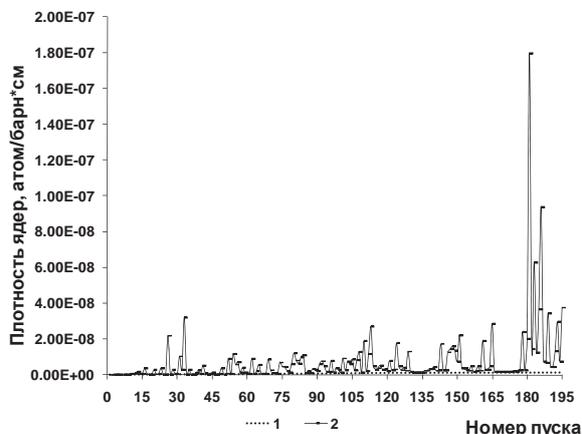


Рис. 7. Распределение плотности ядер ${}^3\text{He}$ в течение длительной работы реактора: 1) с учетом; 2) без учета распада

Fig. 7. Distribution of ${}^3\text{He}$ nuclear density at long-term operation of the reactor: 1) without; 2) with reference to decay

Результаты оценки атомной концентрации лития, трития и гелия в бериллиевых блоках отражателя и вытеснителей реактора ИВГ1.М на 2013 г. приведены в виде графика на рис. 8.

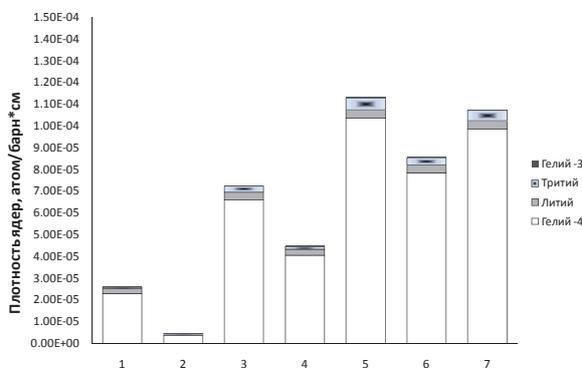


Рис. 8. Концентрации лития, трития и гелия на 2013 г.: 1) отражатель; 2) РБ; 3) центральный вытеснитель; 4) боковой вытеснитель; 5) малые межканальные треугольные вытеснители; 6) межканальные треугольные вытеснители; 7 – межканальные вытеснители

Fig. 8. Concentration of lithium, tritium and helium for 2013: 1) reflector; 2) control drums; 3) central displacer; 4) side displacer; 5) small interchannel triangle displacers; 6) interchannel triangle displacers; 7) interchannel displacers

Из распределений, представленных на рис. 8, видно, что наибольшая концентрация элементов приходится на межканальные вытеснители и треугольники, которые находятся непосредственно рядом с ВОТК.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Нейтронно-физические расчеты были проведены с помощью программы MCNP5, с целью определения эффективного коэффициента размножения $K_{эф}$ и запаса реактивности и эффективности РБ в реакторе ИВГ.1М.

В расчетной модели по результатам расчетов концентраций лития, трития и гелия заданы необходимые примеси в материалах бериллиевых блоков вытеснителей и отражателей с учетом работы реактора ИВГ1.М до 2013 г. Результаты нейтронно-физических расчетов с примесями в материалах бериллиевых блоков приведены в табл. 3, для сравнения также приведены данные расчетной модели без примесей.

Таблица 3. Результаты нейтронно-физических расчетов

Table 3. Results of neutronic calculations

Угол разворота РБ Control drum angle	$K_{эф}/C_{эф}$		Запас реактивности, $\beta_{эф}$ Reactivity charge, $\beta_{эф}$		Эффективность РБ, $\beta_{эф}$ Control drum efficiency, $\beta_{эф}$	
	1	2	1	2	1	2
79°	1,00026± 0,00018	1,00887± 0,00020	0,04	1,37	13,83	13,61
0°	0,95879± 0,00018	0,95975± 0,00021	-6,73	-6,55		
180°	1,04771± 0,00015	1,04734± 0,00017	7,12	7,06		

По результатам расчета, приведенным в табл. 3, видно, что уточнение данных материалов бериллиевых блоков приведет к изменению запаса реактивности при развороте регулирующих барабанов, при этом эффективность РБ снижается приблизительно на 1,6 %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследовательский реактор эксплуатируется с перерывами. Результаты показывают, что периоды останова реактора сильно влияют на накопле-

ние ^3He в бериллиевых блоках, при этом время останова не оказывает непосредственного влияния на концентрацию ^6Li . Однако накопление ^3He изменяет спектр нейтронов и, следовательно, скорость реакции. Это изменение скорости реакции, в свою очередь, влияет на содержание ^6Li в последующие периоды работы реактора.

Отравление бериллия интересно главным образом из-за его влияния на реактивность реактора. Другими словами, важно знать, какое количество ^3He и ^6Li может привести к значительному изменению реактивности реактора. Несомненно, что этот эффект сильно зависит от периодов простоя реактора и основное накопление отравляющих веществ происходит не в периферийных зонах отражателя, а в бериллиевых межканальных вытеснителях, расположенных непосредственно около водоохлаждаемых каналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создана расчетная модель реактора ИВГ.1М, в которой учтены характерные особенности конструкции. Разработана программа для расчета концентраций трития и гелия в бериллиевых блоках.
2. Выполнены расчеты и сделана оценка влияния отравления бериллиевых блоков на реактивность реактора ИВГ.1М с учетом времени наработки и распада в течение длительной работы реактора (с 1975 г.).
3. Проведенные расчетные исследования позволяют сделать вывод, что отравление бериллиевых блоков приведет к изменению запаса реактивности при развороте РБ 79° на 1,33, при 0° на 0,18, при 180° на 0,06, при этом эффективность РБ снижается приблизительно на 1,6 %.
4. Показано, что на изменение ядерных концентраций гелия (^3He) большое влияние оказывают периоды останова реактора.
5. Определены бериллиевые блоки АЗ с наибольшей концентрацией отравляющих элементов.
5. Glasstone S., Sesonske A. Nuclear Reactor Engineering. – New York, USA: D. Van Nostrand Company, Inc., 1967. – 381 p.
6. Khattab K., Sulieman I., Monte Carlo simulation of core physics parameters of the Syrian MNSR reactor // Annals of Nuclear Energy. – 2011. – V. 38 (5). – P. 1211–1213.
7. Khattab K., Haddad Kh., Haj-Hassan H. Design of a permanent Cd-shielded epithermal neutron irradiation site in the Syrian Miniature Neutron Source Reactor // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2008. – V. 277 (2). – P. 311–316.
8. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. – New York: John Wiley&Sons, 2010. – 860 p.
9. Lamarsh J.R. Introduction to Nuclear Engineering. 3rd ed. – Prentice, UK: Prentice & Hall, 2001. – 783 p.
10. Beryllium as reflector of MNSR / S.T. Muhammad, S. Ahmad, K.S. Chaudri, A. Ahmad // Ann. Nucl. Eng. – 2008. – V. 35. – P. 1708–1712.
11. Renterghem W., Van Leenaers A., Van denBerghe S. TEM investigation of long-term annealed highly irradiated beryllium // J. Nucl. Mater. – 2008. – V. 374. – P. 54–60.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koonen E. BR2 Research Reactor Modifications: Experience gained from BR2 Beryllium Matrix Replacement and Second Matrix Surveillance Programme, IAEA-SM-310, AECC-9926 // International Symposium on Research Reactor Safety, Operations and Modifications. – Ontario, Oct. 23–27 1989. – V. 3. – P. 18–22.
2. Влияние отравления бериллия на нейтронно-физические характеристики реактора МИР / О.В. Анисимков и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология. – 1993. – Вып. 1. – С. 49–51.
3. Долотов А.Е., Кузьмин А.В., Куткина И.С. О модели отравления реактора продуктами облученного бериллия // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. докладов 12 Всеросс. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 294–296.
4. Andrzejewski K.J., Kulikowska T.A., Marcinkowska Z.E. Computations of fuel management in MARIA reactor with highly poisoned beryllium matrix // Nukleonika. – 2008. – V. 53 (4). – P. 173–179.

12. Khattab K. Sulieman I., Calculation of the top beryllium shim plate worths for the of the Syrian miniature neutron source reactor // Progress in Nuclear Energy. – 2004. – V. 44 (1). – P. 33–42.
13. Omarn H., Ghazi N., Haddad Kh. Ezzuddin Study the effect of beryllium reflector poisoning on the Syrian MNSR // Applied Radiation and Isotopes. – 2012. – V. 70. – P. 988–993.
14. Прозорова И.В. Определение содержания трития и гелия в облученном бериллии // Ядерная и радиационная физика: Матер. докладов девятой Междунар. конф. – Алматы: РГПИ ИЯФ, 2013. – С. 66–69.
15. Реакторные комплексы ИГР, «Байкал-1», ВВР-К и перспективы развития на их базе фундаментальных и прикладных исследований / Э.С. Айтхожин, Ф.М. Аринкин, Г.А. Батырбеков и др.: препринт НЯЦ РК-00–12. – Курчатов: НЯЦ РК, 2000. – 75 с.
16. X-5 Monte Carlo Team, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, V. II: User's guide, Los Alamos National Laboratories. Los Alamos, New Mexico, 2003.
17. Van der Marck S.C. Benchmarking ENDF/B-VII.0 // Nuclear Data Sheets. – 2006. – V. 107 (12). – P. 3061–3118.
18. Серняев Г.А. Радиационная повреждаемость бериллия. – Екатеринбург: Изд-во «Екатеринбург», 2001. – 396 с.
19. Comparison of nuclear data uncertainty propagation methodologies for PWR burn-up simulations / C.J. Dieza, O. Bussc, A. Hoferc, D. Porschd, O. Cabellosa // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – P. 101–114.
20. Chandler D. Spatially-Dependent Reactor Kinetics and Supporting Physics Validation Studies at the High Flux Isotope Reactor. PhD diss. – University of Tennessee, 2011.
21. High accuracy tritium measurement for the verification of the tritium production rate calculations with MCNPX / I. Rovnia, M. Sziebertha, L. Palcsu, Z. Majorb, S. Fehera // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2013. – V. 714. – P. 141–146.
22. Comparative validation of Monte Carlo codes for the conversion of a research reactor / V.P. Alferova, A.I. Radaeva, M.V. Shchurovskayaa, G.V. Tikhomirova, N.A. Hanan, F.A. Heerdenc // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – P. 273–280.
23. Brian S., Jeff S. Using Visual Basic. – Indianapolis, USA: Que, 1998. – 860 p.

Поступила 16.06.2014 г.

UDC 621.039.572

INFLUENCE OF POISONING OF BERYLLIUM BLOCKS ON REACTIVITY OF THE IVG.1M REACTOR

Irina V. Prozorova,

Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan,
10, Krasnoarmeickaya street, Kurchatov, 711100, Republic of Kazakhstan. E-mail:
Prozorova@nnc.kz

The relevance of the discussed issue is caused by the need to evaluate the effect of beryllium blocks poisoning on nuclear reactivity, flux density of thermal neutrons and power distribution of IVG.1M reactor.

The main aim of the study is to evaluate the effect of beryllium blocks poisoning on neutronic characteristics of the IVG.1M reactor.

The methods used in the study. A solution of the problem included two stages: at the first stage the author carried out neutronic calculations of rates of a reaction and the neutron-flux density using MCNP5 program. At the second stage the author developed the program in the programming language Visual Basic in the Excel to solve the systems with known start values of concentrations for beryllium, lithium, tritium and helium.

The results. The paper introduces the results of neutron and physical calculations of the IVG.1M. reactor active zone from 1975 to 2013 taking into account the periods of start-up and idle times between start-ups, and the results of determination of beryllium poisoning effect on reactivity. The results show that the reactor shutdown periods influence significantly on helium-3 accumulation in beryllium blocks. This changes neutron spectrum in its turn. The shutdown period duration does not influence lithium-6 concentration. Poisoning substances are mostly accumulated not in reflector perimeter zones but in beryllium interchannel displacers near water-cooling channels. The results of calculations can be used to assess neutron and physical characteristics of the reactor during the long time. The design model with the specified impurity of of beryllium displacer materials and a reflector can be used for receiving more exact results at calculations.

Key words:

Reactor IVG.1M, poisoning, beryllium, reaction rate, neutronic calculations.

REFERENCES

- Koonen E. BR2 Research Reactor Modifications: Experience gained from BR2 Beryllium Matrix Replacement and Second Matrix Surveillance Programme, IAEA-SM-310, AECC-9926. *International Symposium on Research Reactor Safety, Operations and Modifications*. Ontario, Oct. 23–27 1989. Vol. 3, pp. 18–22.
- Anisimkov O. Vliyaniye otravleniya berilliya na neytronno-fizicheskie kharakteristiki reaktora MIR [Effect of beryllium poisoning on neutronic characteristics of the MIR reactor]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Yadernaya tekhnika i tekhnologiya – Problems of atomic science and technology. Ser. Nuclear energy technology and technique*, 1993, Iss. 1, pp. 49–51.
- Dolotov A.E., Kuzmin A.V., Kutkina I.S. O modeli otravleniya reaktora produktami oblučennoogo berilliya [The model of reactor poisoning with irradiated beryllium products]. *Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost. Materialy dokladov 12 Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proc. of the twelfth All-Russian scientific and technical conference. Power engineering: ecology, safety, security]. Tomsk, TPU Publ. house, 2006. pp. 294–296.
- Andrzejewski K.J., Kulikowska T.A., Marcinkowska Z.E. Computations of fuel management in MARIA reactor with highly poisoned beryllium matrix. *Nukleonika*, 2008, vol. 53 (4), pp. 173–179.
- Glasstone S., Sesonske A. *Nuclear Reactor Engineering*. New York, USA, D.Van Nostrand Company, Inc., 1967. 381 p.
- Khattab K., Sulieman I., Monte Carlo simulation of core physics parameters of the Syrian MNSR reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, vol. 38 (5), pp. 1211–1213.
- Khattab K., Haddad Kh., Haj-Hassan H. Design of a permanent Cd-shielded epithermal neutron irradiation site in the Syrian Miniature Neutron Source Reactor. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2008, vol. 277 (2), pp. 311–316.
- Knoll G.F. *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed. New York, John Wiley&Sons, 2010. 860 p.
- Lamarsh J.R. *Introduction to Nuclear Engineering*. 3rd ed. Prentice, UK, Prentice & Hall, 2001. 783 p.
- Muhammad S.T., Ahmad S., Chaudri K.S., Ahmad A. Beryllium as reflector of MNSR. *Ann. Nucl. Eng.*, 2008, vol. 35, pp. 1708–1712.
- Renterghem W., Van Leenaers A., Van denBerghe S. TEM investigation of long-term annealed highly irradiated beryllium. *J. Nucl. Mater.*, 2008, vol. 374, pp. 54–60.
- Khattab K. Sulieman I., Calculation of the top beryllium shim plate worths for the of the Syrian miniature neutron source reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 2004, vol. 44 (1), pp. 33–42.
- Omarn H., Ghazi N., Haddad Kh. Ezzuddin Study the effect of beryllium reflector poisoning on the Syrian MNSR. *Applied Radiation and Isotopes*, 2012, vol. 70, pp. 988–993.
- Prozorova I.V. Opredelenie sodержaniya tritiya i geliya v oblučennoem berillii [Determination of tritium and helium content in irradiated beryllium]. *Yadernaya i radiatsionnaya fizika. Materialy dokladov devyatoy mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of the ninth International conference. Nuclear and radiation physics]. Almaty, RSE INP Press, 2013. pp. 66–69.
- Aitkhozhin E.S., Arinkin F.M., Batyrbekov G.A. *Reaktornye komplekсы IGR, «Baikal-1», VVR-K i perspektivy razvitiya na ikh baze fundamentalnykh i prikladnykh issledovany: preprint NY-aTs RK-00–12* [The reactor complexes IGR, «Baikal-1», VVR-K and prospects of developing the basic and applied research on their basis: preprint NNC RK-00–12]. Kurchatov, NNC RK Press, 2000. 75 p.
- X-5 Monte Carlo Team, MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, V. II: User's guide, Los Alamos National Laboratories. Los Alamos, New Mexico, 2003.
- Van der Marck S.C. Benchmarking ENDF/B-VII.0. *Nuclear Data Sheets*, 2006, vol. 107 (12), pp. 3061–3118.
- Sernyaev G.A. *Radiatsionnaya povrezhdaemost berilliya* [Beryllium radiation damageability]. Yekaterinburg, Yekaterinburg Publ., 2001. 396 p.
- Dieza C.J., Busse O., Hoeferc A., Porschd D., Cabellosa O. Comparison of nuclear data uncertainty propagation methodologies for PWR burn-up simulations. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, pp. 101–114.
- Chandler D. *Spatially-Dependent Reactor Kinetics and Supporting Physics Validation Studies at the High Flux Isotope Reactor*. PhD diss. University of Tennessee, 2011.
- Rovnia I., Sziebertha M., Palcsu L., Majorb Z., Fehera S. High accuracy tritium measurement for the verification of the tritium production rate calculations with MCNPX. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, vol. 714, pp. 141–146.
- Alferova V.P., Radaeva A.I., Shchurovskaya M.V., Tikhomirova G.V., Hanan N.A., Heerdenc F.A. Comparative validation of Monte Carlo codes for the conversion of a research reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, pp. 273–280.
- Brian S., Jeff S. *Using Visual Basic*. Indianapolis, USA, Que, 1998. 860 p.

Received: 16 June 2014.

Редактирование *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык и корректура *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Подписано к печати *xx.xx.2015*. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 18,15. Уч.-изд. л. 16,41.
Заказ *xx-15*. Тираж 110 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru