

На правах рукописи



Мищенко Мария Валериевна

**ТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДЫ МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ  
ЧАСТИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА:  
РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ, ПРОГНОЗЫ**

Специальность 25.00.07 – Гидрогеология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Томск–2013

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

**Научные руководители:**

доктор геолого-минералогических наук, профессор Букаты Михаил Болеславович  
доктор геолого-минералогических наук, профессор Дутова Екатерина Матвеевна

**Официальные оппоненты:**

**Курчиков Аркадий Романович**, член-корр. РАН, д.г.-м.н., профессор, Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, директор

**Манылова Любовь Семеновна**, к.г.-м.н., Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, ученый секретарь

**Ведущая организация:**

Открытое акционерное общество «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа», г. Томск

**Защита состоится** «22» апреля в 9<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета ДМ212.269.03 при ФГБОУ ВПО «Национальном исследовательском Томском политехническом университете», по адресу г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национального исследовательского Томского политехнического университета» (634050, г. Томск, ул. Белинского, 55).

Автореферат разослан «20» марта 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.г.-м.н.

Лепокурова Олеся Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Интенсивный рост энергопотребления в России и многих странах мира обусловил заметное снижение легкодоступных запасов традиционных источников энергоресурсов. Как следствие, это привело к повышению их стоимости и росту экологической нагрузки на природную и социальную среду и обусловило необходимость широкого привлечения нетрадиционных источников возобновляемой энергии – ветровой, солнечной, приливной, органической (биомассы), геотермальной. Одно из ведущих мест среди таких источников занимают термальные подземные воды, обладающие достаточным тепловым потенциалом для удовлетворения значительной части энергетической потребности человечества.

В Западной Сибири проблема освоения геотермальных ресурсов актуальна в связи с выявленными большими запасами геотермальной энергии, составляющими по различным оценкам до 70 % всех геотермальных ресурсов Российской Федерации. В Томской области, занимающей юго-восточную часть Западно-Сибирского артезианского бассейна, сосредоточено большое количество населённых пунктов, удалённых от централизованных систем теплоснабжения и основных транспортных магистралей. В то же время на её территории рассредоточено большое число законсервированных нефтегазопромысловых скважин, вскрывших подземные термальные воды и расположенных в непосредственной близости от поселков, расположенных в суровых северных условиях.

Потенциал геотермальных ресурсов Томской области позволяет решать многие энергетические проблемы региона, особенно в целях экономически целесообразного подхода к электро- и теплоснабжению населённых пунктов удалённых от централизованных систем теплоснабжения и основных транспортных магистралей. Это отвечает программам ООН о развитии малой энергетики и Киотскому протоколу «Об ограничении выбросов в атмосферу Земли парниковых газов и загрязняющих веществ», а также закону Российской Федерации «Об энергосбережении...».

Гидрогеологические, гидрогеохимические и геотермические условия осадочного чехла Западно-Сибирской плиты изучались как производственными геологическими, так и научными организациями и охватывают почти столетний период. Их результаты отражены в многочисленных отчетах, статьях, монографиях и диссертациях М.Б. Букаты, Л.С. Бычковой Н.Н. Винниченко, Е.М. Дутовой, А.Д. Дучкова, Н.А. Ермашовой, Г.Д. Гинсбурга, Г.Д. Гурари, Ю.Г. Зимина, В.А. Зуева, Е.А. Жуковской, В.Г. Иванова, Ю.Н. Карагодина, А.Э. Конторовича, А.Р. Курчикова, Б.Ф. Маврицкого, Л.С. Маныловой, В.М. Матусевича, М.П. Нагорского, А.Д. Назарова, В.А. Нуднера, Г.Л. Плевако, Д.С. Покровского, В.К. Попова, Н.М. Рассказова, А.А. Розина, С.И. Сергиенко, Я.Б. Смирнова, Ю.К. Смоленцева, Б.П. Ставицкого, В.В. Трушкина, П.А. Удодова, С.Л. Шварцева и других. Вместе с тем, несмотря на наличие значительного количества научных работ многие вопросы, связанные с особенностями распространения и эксплуатации термальных подземных вод остались недостаточно изученными. Появившаяся в настоящее время методическая основа и программное обеспечение численного моделирования гидрогеологических, гидрогеохимических и гидрогеотермических процессов позволяет на новом уровне подойти к анализу и решению этих вопросов.

В данной работе рассматриваются термальные подземные воды меловых отложений Томской области, а в качестве объектов детальных исследований выбраны Колпашевская, Первомайская, Оленья и Южно-Черемшанская площади.

**Цель работы** – установить особенности распространения, запасы и тепловые ресурсы термальных вод меловых отложений Томской области и выявить характер изменения геотемпературного поля и вторичного минералообразования при их использовании как альтернативных источников энергии.

**Основные задачи:** 1) анализ геологических, гидрогеологических и геотермических условий водоносных комплексов меловых отложений, содержащих термальные воды; 2) оценка запасов и тепловых ресурсов термальных вод; 3) моделирование изменения геотемпературного поля в процессе эксплуатации термальных вод; 4) моделирование вторичного минералообразования в стволе добывающих скважин при эксплуатации термальных вод.

**Исходные материалы и методика исследования.** В основу диссертационной работы положен фактический материал, полученный автором в ходе научных исследований, проводимых в лаборатории гидрогеологии нефтегазоносных бассейнов ТФ ИНГГ СО РАН, а также НИ ТПУ, ИПР, где автор и работает в настоящее время. В работе использована фондовая информация ФГУ ТФИ по Томской области, материалы кафедры ГИГЭ ТПУ и Томского филиала ИНГГ СО РАН. В обработке и анализе учтены гидрогеологические и гидрогеохимические данные по 150 скважинам, в том числе более 250 замеров температур и термограмм, данные гидродинамических исследований 28 скважин, расположенных на наиболее перспективных на термальные воды площадях и более 3 тыс. анализов состава подземных вод Томской области.

Собранные материалы сведены в базу данных Access. Статистическая обработка численной информации выполнялась в программах Microsoft Office Excel и StartSoft Statistica, картографические построения осуществлялись с помощью программ Surfer и CorelDRAW. Расчёты запасов, изменения температурного режима подземных вод и оценка вторичного минералообразования в процессе их добычи осуществлялись на основе численного моделирования с использованием программного комплекса HydroGeo, разработанного М.Б. Букаты.

**Научная новизна.** Установлено, что для теплоснабжения в Томской области наиболее перспективны термальные воды апт-альб-сеноманского, готерив-барремского и валанжинского водоносных комплексов. Впервые для условий Западной Сибири осуществлено моделирование эксплуатации термальных подземных вод в замкнутом и открытом циклах, оценено изменение температурного режима подземных вод. Дана оценка ресурсов и объёмных и тепловых эксплуатационных запасов термальных вод. Показано, что процесс добычи термальных вод будет сопровождаться вторичным минералообразованием в стволе эксплуатационных скважин.

**Практическая значимость работы** заключается в оценке прогнозных эксплуатационных запасов, тепловых ресурсов и качества термальных подземных вод в пределах перспективных для первоочередного освоения площадей Томской области, а также в разработке рекомендаций по их использованию.

#### **Защищаемые положения.**

1. Основные ресурсы термальных подземных вод региона связаны с нижнемеловыми отложениями и сосредоточены в валанжинском, готерив-барремском и апт-альб-сеноманском водоносных комплексах, для которых установлен общий региональный тренд повышения температурного фона с юго-востока на северо-запад. Вертикальная и латеральная зональность в распределении

температур подземных вод обусловлена глубиной залегания водоносного комплекса, направлением потоков вод и литологическим составом водовмещающих пород.

2. Эксплуатация меловых геотермальных систем приведёт к постепенному снижению температурного фона подземных вод. «Замкнутый» цикл эксплуатации вызовет снижение температур в целом по разрезу, при «открытом» цикле максимальные изменения температур будут приурочены к призабойным частям нагнетательных (нагрев) и добывающих (охлаждение) скважин.

3. Эксплуатация термальных вод приведёт к природно-техногенному минералообразованию в стволе скважины и на водоподъёмном оборудовании. Состав и масштабы формирования вторичной фазы зависят от исходной минералообразующей способности термальных вод и степени изменения термобарических условий при их эксплуатации.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на VI, VII, VIII, X, XI Международных симпозиумах имени академика М.А. Усова (Томск, 2002, 2003, 2004, 2007, 2009), на II Всероссийской конференции молодых учёных (Томск, 2003), на конференции, посвящённой 75-летию кафедры ГИГЭ Томского политехнического университета (Томск, 2005), на Всероссийском совещании по подземным водам востока России (Иркутск, 2006; Тюмень, 2009), на Трофимукских чтениях (Новосибирск, 2006, 2007, 2008), на Всероссийской молодёжной конференции (Иркутск, 2009).

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 19 печатных работах, из них: 3 – в центральных изданиях, включённых в перечень ВАК, 6 – в научно-технических сборниках и материалах конференций, 10 – тезисы докладов на различных конференциях.

**Личный вклад автора.** Автором осуществлён сбор фактического материала, проведён статистический анализ и выполнены картографические построения, проведены расчёты по оценке ресурсов, объёмных и тепловых эксплуатационных запасов термальных вод, осуществлено моделирование эксплуатации термальных подземных вод и оценено изменение их температурного режима, показаны состав и масштабы вторичного минералообразования, интерпретированы результаты и сформулированы выводы.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Список литературных источников составляет 164 наименования. Общий объём работы – 159 страниц, включая 33 рисунка и 22 таблицы.

**Благодарности.** При написании диссертационной работы автор неоднократно обращался к д.г.-м.н. С.Л. Шварцеву, Д.С. Покровскому, В.К. Попову, Л.А. Строковой, В.Б. Белозерову, В.П. Парначеву, к.г.-м.н. В.П. Меркулову, О.С. Черновой, Г.М. Татьянину, Е.А. Жуковской, К.И. Кузеванову, Д.А. Новикову, В.В. Крамаренко, которым выражает благодарность за советы и методические рекомендации.

Автор благодарна за помощь, бесценные советы, моральную поддержку и содействие в выполнении работы к.г.-м.н. А.Д. Назарову.

Особую признательность за терпеливую поддержку, высокие требования к работе и ценные советы автор выражает, ныне покойному, Михаилу Болеславовичу Букаты, а также Екатерине Матвеевне Дутовой оказавшей поддержку на завершающем этапе работы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна полученных результатов, защищаемые положения, практическая значимость работы.

В первой главе **«Состояние изученности и постановка проблемы исследований»** освещаются современные представления о термальных водах, анализируется состояние изученности термальных вод Томской области, и отмечаются проблемы их рационального и комплексного использования.

Во второй главе **«Общие геологические и гидрогеологические условия распространения термальных вод»** приведены краткие сведения о геологическом строении, особенностях тектоники, гидрогеологических условиях района исследований. Подчёркивается, что наиболее доступны и перспективны в отношении использования термальных вод, в связи со своей выдержанностью по площади, высокой водообильностью, хорошими фильтрационно-ёмкостными свойствами и высокой температурой являются водоносные комплексы меловых отложений, ставшие основным предметом исследований.

В третьей главе **«Распространение и запасы термальных вод»** анализируются геотермические условия района, геотермическая характеристика разреза, распределение пластовых температур по трём водоносным комплексам. Отмечается, что характер изменения температур и величины геотермического градиента в разрезе осадочного чехла подчиняются вертикальной и латеральной температурной зональностям. В главе представлена оценка ресурсов термальных вод меловых отложений, объёмных и тепловых эксплуатационных запасов термальных вод перспективных площадей.

В четвертой главе **«Состав термальных вод и особенности его формирования»** анализируются пространственные глубинные и латеральные изменения величины минерализации, химического, газового и микрокомпонентного состава подземных вод меловых отложений, рассматриваются вопросы формирования и генезиса термальных вод. Подчёркивается, что эволюция состава подземных вод региона проходит под воздействием преимущественно палеогеографических, литолого-фациальных и термобарических условий при длительном взаимодействии в системе «вода-порода-газ-органическое вещество».

В пятой главе **«Прогнозирование последствий эксплуатации термальных вод»** охарактеризована методика численного моделирования процессов эксплуатации термальных вод. Представлены результаты моделирования, характеризующие прогнозные изменения температурного режима подземных вод в «замкнутом» и «открытом» циклах эксплуатации и показано, что процесс добычи термальных вод будет сопровождаться вторичным минералообразованием в стволе эксплуатационных скважин.

В шестой главе «Перспективы использования термальных подземных вод» даны рекомендации по возможности использования термальных вод с учётом особенностей рассматриваемого региона.

В **Заключении** приведены основные выводы исследований.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**1. Основные ресурсы термальных подземных вод региона связаны с нижнемеловыми отложениями и сосредоточены в валанжинском, готерив-барремском и апт-альб-сеноманском водоносных комплексах, для которых установлен общий региональный тренд повышения температурного фона с юго-востока на северо-запад. Вертикальная и латеральная зональность в распределении температур подземных вод обусловлена глубиной залегания водоносного комплекса, направлением потоков вод и литологическим составом водовмещающих пород.**

В гидрогеологическом отношении исследуемый район расположен в юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна, в геологическом строении которого выделяется два структурных этажа. Верхний этаж, представленный осадочным чехлом (мезозойско-кайнозойские отложения), образует сплошную толщу пологозалегающих, разнофациальных песчано-глинистых отложений. Нижний (складчатый) представлен глубоко метаморфизованными, сильно дислоцированными породами докембрия и палеозоя, прорванными интрузиями различного состава и возраста.

Предметом исследований являются наиболее доступные и перспективные в отношении эксплуатации водоносные комплексы меловых отложений (апт-альб-сеноманский, готерив-барремский и валанжинский водоносные комплексы) в связи с их выдержанностью по площади, высокой водообильностью, хорошими фильтрационно-ёмкостными свойствами и высокой температурой термальных подземных вод.

**Апт-альб-сеноманский ( $K_{1-2} a-a-sm$ ) водоносный комплекс** залегает на глубинах 900–1000 м, имеет мощность 600–900 м. Представлен неравномерным чередованием изменяющихся по мощности и фильтрационно-ёмкостным свойствам разнородных слабосцементированных песчаников, алевролитов и глин.

Коэффициенты песчаности отложений комплекса изменяются в пределах 0.28–0.56 (в среднем 0,41), открытая пористость песчано-алевритовых пород составляет 15–20 %. Коэффициент фильтрации изменяется в пределах 0.61–1.44 м/сут, коэффициент водопроницаемости – 125–300 м<sup>2</sup>/сут. Для подземных вод характерны высокие напоры – до 70 м над устьем скважины. Дебиты скважин при фонтанировании составляют 500–1000 м<sup>3</sup>/сут, достигая в отдельных случаях 2–4 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Минерализация и состав вод закономерно изменяются в северо-западном направлении от нормально пресных (0.6 г/л) азотно-метановых гидрокарбонатных





**Условные обозначения**

- 44 - Изотермы   
 Парб - Площади   
 Томск - Населенные пункты   
 Чая - Реки  
  - Граница Томской области   
⚡ - Площади детального изучения

Рис 1. Изотермы подземных вод меловых отложений Томской области



натриевых (содовых) и гидрокарбонатно-хлоридных натриевых до солёных (9 г/л) и крепко-солёных (15–19 г/л) метановых хлоридных натриевых.

**Готерив-барремский ( $K_1g-b$ ) водоносный комплекс**, залегает на глубинах 1600–2000 м, имеет мощность 400–800 м, представлен песчано-глинисто-алевритовыми неравномерно слоистыми лагунно-континентальными отложениями. Коэффициент песчаности отложений равен 0.4–0.6, увеличиваясь в восточном направлении до 0.7–0.88. Открытая пористость 20–30 %, реже до 40 %. Дебиты разведочных скважин не превышают 40–80 м<sup>3</sup>/сут. при самоизливе.

Минерализация и состав термальных вод изменяется с востока на запад от солоноватых (1–1.5 г/л) гидрокарбонатно-хлоридных натриевых азотно-метановых до крепко-солёных (10–25 г/л) хлоридных кальциево-натриевых. Хлоридные кальциево-натриевые воды на нефтяных месторождениях пересыщены карбонатами кальция, магния.

**Валанжинский ( $K_1v$ ) водоносный комплекс**, залегает на глубинах 2000–2800 м, сложен мелководно-морскими песчаными и песчано-алевритовыми отложениями относительно выдержанными по площади распространения, мощностью 45–200 м. Проницаемость песчаников составляет 0.6–2 Д, а открытая пористость достигает 30–40 %.

Для водоносного комплекса характерна наибольшая однородность и выдержанность фильтрационно-ёмкостных свойств и песчаности, что обусловило его высокую продуктивность. Дебиты скважин варьируют в пределах 70–500 м<sup>3</sup>/сут, иногда достигая 700–850 м<sup>3</sup>/сут. Воды высокотермальные с пластовыми температурами от 85–87 °С до 91–93 °С. По химическому составу воды на востоке повсеместно хлоридные азотно-натриевые солёные, а на западе метановые, хлоридные кальциево-натриевые, крепко солёные.

Пластовая температура подземных вод в пределах меловых отложений изменяется в широком диапазоне – от 10 до 110 °С. Разброс температур связан с величиной теплового потока, характером тектонической структуры, интенсивностью развития дизъюнктивной тектоники и проявлением многих других факторов.

На основании имеющегося фактического материала составлены карты распределения пластовых температур, отдельно по трём водоносным комплексам. Характер изменения температурного поля в них имеет схожую тенденцию и подчиняется горизонтальной и вертикальной зональности обуславливающей увеличение температур в северо-западном направлении (рис. 1). В апт-альб-сеноманском комплексе преимущественно распространены тёплые и горячие воды (20–50 °С), однако в юго-восточной части Томской области отмечена зона с холодными водами (13–20 °С). В готерив-барремском распространены подземные воды с температурой 20–97 °С, а в валанжинском температуры достигают 105–110 °С.

Характер изменения температуры и величины геотермического градиента в разрезе осадочного чехла исследуемых площадей подчиняется вертикальной температурной зональности. В верхней его части, характеризующейся низкой

температурой подземных вод (до 20 °С) на геотермические условия существенное влияние оказывают инфильтрационные воды. В центральной части Томской области зона холодных вод достигает 900 м (Колпашевская площадь), в западной части не превышает 450 м (Оленья, Первомайская и Южно-Черемшанская площади). Ниже прослеживается повышение температур и геотермического градиента, связанное с глубинным теплом земли (табл. 1).

В целом геотермические условия исследуемого района определяются глубиной залегания водоносного комплекса, направлением потоков вод и составом водовмещающих пород. Степень значимости этих факторов зависит от местоположения конкретного участка и его тектонического строения. В основном исследуемая область характеризуется повышенными геотермическими градиентами, 3.1–4.2 °С/100 м.

**Таблица 1.** Средние значения геотермического градиента (ГТГ, °С /100 м) и температуры (Т, °С)

Площадь	Водоносные комплексы					
	Апт-альб-сеноманский		Готерив-барремский		Валанжинский	
	ГТГ	Т	ГТГ	Т	ГТГ	Т
Колпашевская	3.85	44.0	4.15	64.0	3.70	81.5
Оленья	3.30	44.0	3.75	65.2	3.15	78.8
Первомайская	3.30	43.7	3.50	54.3	3.90	75.3
Южно-Черемшанская	3.30	54.2	3.70	80.7	3.75	87.4

В связи с возможностью использования термальных подземных вод были оценены эксплуатационные запасы и тепловые ресурсы перспективных площадей, как одиночных водозаборов.

Расчёты эксплуатационных запасов проводились с помощью гидродинамического блока ПК «HydroGeo», отдельно для каждой перспективной площади и каждого из трёх водоносных комплексов, представленных в них, предполагая, что ресурсы могут быть использованы независимо.

Результаты, приведённые в табл. 2, свидетельствуют, что все водоносные комплексы обладают обеспеченными запасами термальных подземных вод, так как расчётные понижения уровня ниже допустимых значений.

Для оценки тепловых ресурсов, заключённых в подземных водах, использована зависимость (Ресурсы..., 1975):

$$G = 10^3 \cdot Q \cdot T \cdot \eta_{\text{гео}} C,$$

где  $G$  – тепловые ресурсы, ГДж/сут;  $Q$  – дебит скважины, м<sup>3</sup>/сут;  $T$  – температура извлекаемой воды из скважины, °С;  $C$  – удельная теплоёмкость (в нашем случае, в соответствии со справочником принимается 4.184, кДж/кг·°С);  $\eta_{\text{геот}}$  – коэффициент полезного использования тепла термальных вод, 0.5–0.55.

**Таблица 2.** Эксплуатационные запасы подземных термальных вод

Площадь	Водоносные комплексы	Принимаемые величины			Расчётные величины	
		$Kф$ , м/сут	$m$ , м	$a$ , $10^3$ м <sup>2</sup> /сут	$S_p$ , м	$Q_{max}$ , м <sup>3</sup> /сут
Колпашевская	Апт-альб-сеноманский	1.25	150	125	56.68	26460
		3.0	150	300	24.39	61500
	Готерив-барремский	1.0	130	100	81.07	15800
		2.0	130	200	41.59	36060
	Валанжинский	1.2	100	120	88.43	16960
4.7		100	470	23.73	63200	
Южно-Черемшанская	Апт-альб-сеноманский	0.38	102	334	284.27	5277
		0.57	120	479	163.18	9192
	Готерив-барремский	2.86	35	100	105.28	14250
		5.71	35	200	54.112	27720
	Валанжинский	2.7	45	120	87.334	17180
10.4		45	470	23.834	62940	
Оленья	Апт-альб-сеноманский	0.63	118	515	150.53	9965
		0.95	96	752	124.62	12040
	Готерив-барремский	2.5	40	100	105.39	14230
		5.0	40	200	54.072	27740
	Валанжинский	1.85	65	120	88.242	17000
7.2		65	470	23.834	62940	
Первомайская	Апт-альб-сеноманский	0.49	102	409	221.85	6761
		0.77	71	612	206.53	7263
	Готерив-барремский	3.0	40	100	88.426	16960
		11.75	40	200	23.733	63200
	Валанжинский	3.3	30	120	106.45	14090
6.7		30	470	53.803	27880	

*Примечание:* Для каждого комплекса оценка проведена при  $min$  (верхняя строка) и  $max$  (нижняя строка) значениях фильтрационно-ёмкостных свойств, которые в них наблюдаются;  $Kф$  – коэффициент фильтрации,  $a$  – коэффициент пьезопроводности,  $S_p$  – расчётное понижение при  $Q = 5000$  м<sup>3</sup>/сут,  $Q_{max}$  – максимально возможный дебит при допустимом понижении (300 м).

Проведённые расчёты тепловых ресурсов показали, что термальные воды, приуроченные к отложениям апт-альб-сеноманского, готерив-барремского и валанжинского водоносных комплексов заключают в себе значительные энергетические ресурсы (табл. 3). При использовании термоскважин, стенки, которых изолированы теплоизоляционным материалом, коэффициент полезного использования тепла термальных вод может быть увеличен до 0.75, что обуславливает возможность повышения температуры извлекаемых вод на 8–10 °С. В этом случае тепловые ресурсы возрастут в 2–2.5 раза.

**Таблица 3. Тепловые ресурсы**

Площади	Водоносные комплексы	Обычные скважины		Термоскважины	
		T, °C	G при $\eta_{\text{геот}}=0.5$ , ГДж/сут	T, °C	G при $\eta_{\text{геот}}=0.75$ , ГДж/сут
Колпашевкая	апт-альб-сеноманский	24	250	34	535
	готерив-барремский	55	575	65	1020
	валанжинский	66	690	76	1195
Южно-Черемшанская	апт-альб-сеноманский	46	480	56	880
	готерив-барремский	63	660	73	1145
	валанжинский	91	955	101	1585
Оленья	апт-альб-сеноманский	47	495	57	895
	готерив-барремский	58	610	68	1070
	валанжинский	81	850	91	1430
Первомайская	апт-альб-сеноманский	43	450	53	830
	готерив-барремский	72	755	82	1290
	валанжинский	80	840	90	1412

Проведённые расчёты показали, что подземные термальные воды апт-альб-сеноманского, готерив-барремского и валанжинского водоносных комплексов могут использоваться для выработки энергии и создания на их базе геотермальных комплексных систем.

**2. Эксплуатация меловых геотермальных систем приведёт к постепенному снижению температурного фона подземных вод. «Замкнутый» цикл эксплуатации вызовет снижение температур в целом по разрезу, при «открытом» цикле максимальные изменения температур будут приурочены к призабойным частям нагнетательных (нагрев) и добывающих (охлаждение) скважин.**

Оценка возможного изменения температуры термальных подземных вод в процессе эксплуатации является одной из ключевых проблем их практического использования. В настоящей работе она решалась на основе численного моделирования тепломассопереноса с помощью ПК «HydroGeo», разработанного М.Б. Букаты.

Прогноз изменения температур путём моделирования гидродинамического и геотемпературного поля осуществлялся на основе использования 3D-сеточной модели. При совместном моделировании геофильтрации, теплопереноса и геомиграции применён подход, предусматривающий расщепление вычислений на условно независимые гидродинамическую, геотемпературную и геохимическую составляющие. Моделирование кондуктивного теплопереноса основано на использовании метода релаксации.

Моделирование процесса эксплуатации термальных вод на перспективных площадях проводился по единой схеме для двух циклов эксплуатации. «Замкнутый» – добыча термальных вод из нижней части водоносного комплекса и возврат охлаждённых отработанных вод в верхнюю часть того же водоносного комплекса. «Открытый» – добыча термальных вод из нижней части валанжинского

водоносного комплекса и возврат охлаждённых отработанных вод в верхнюю часть апт-альб-сеноманского водоносного комплекса.

Исходные характеристики водоносных комплексов приведены в табл. 4. Теплопроводность пород 2 Вт/м·К, принята в соответствие с А.Р. Курчиковым и Б.П. Ставицким (1987).

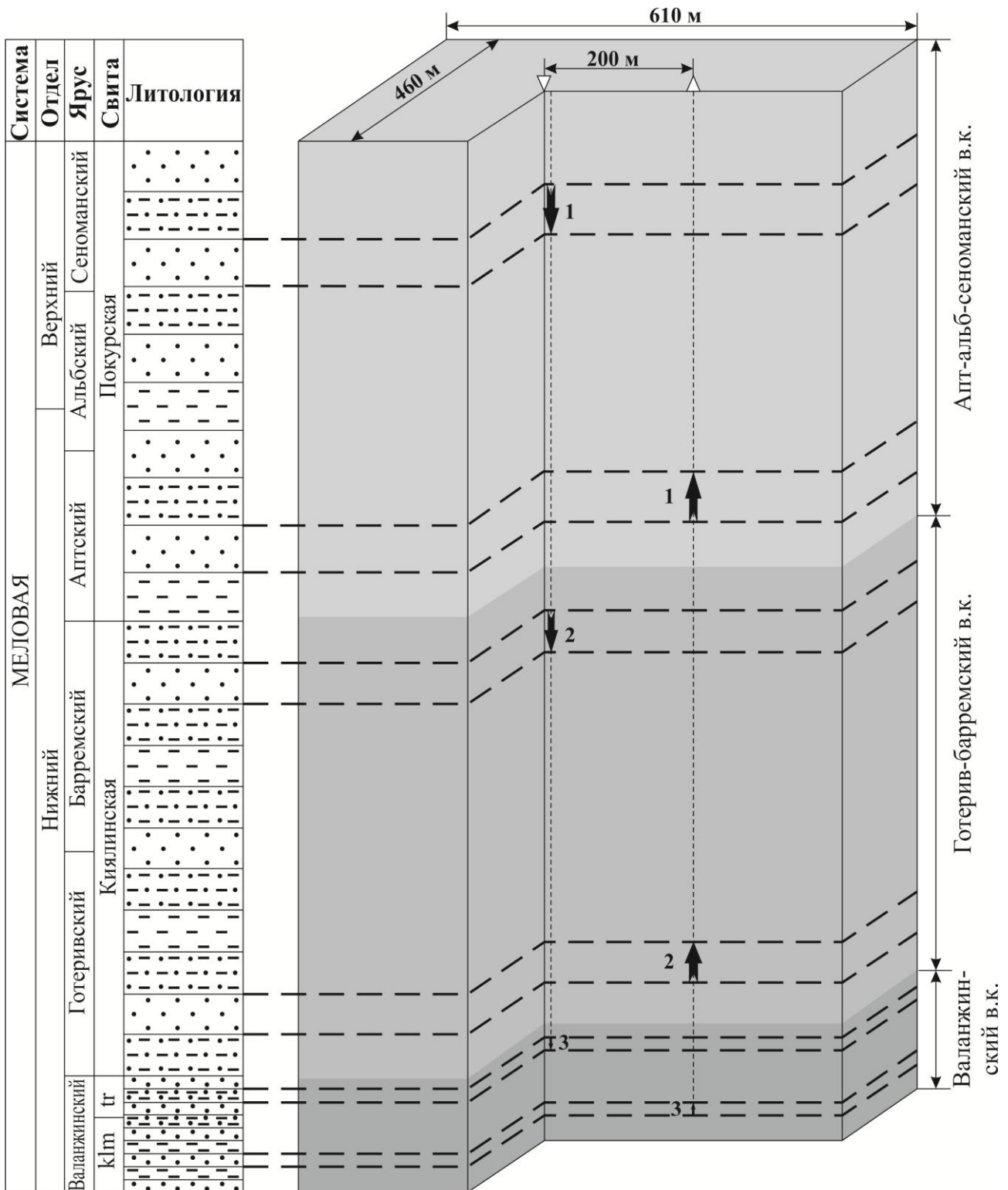
Расстояние между добывающей и нагнетательной скважинами равно 200 м (рис. 2). Дебиты добывающей и нагнетательной скважин приняты равными 5000 м<sup>3</sup>/сут. Расчётные временные интервалы (контрольные точки) 182, 365 10000 сут.

**Таблица 4.** Исходные характеристики водоносных комплексов

Показатели	Площади												
	Колпашевская			Первомайская			Оленья			Южно-Черемшанская			
	Апт-альб-сеноманский	Готерив-барремский	Валанжинский	Апт-альб-сеноманский	Готерив-барремский	Валанжинский	Апт-альб-сеноманский	Готерив-барремский	Валанжинский	Апт-альб-сеноманский	Готерив-барремский	Валанжинский	
Мощность, м	810	770	207	781	414	405	770	451	423	814	517	396	
Коэффициент фильтрации, м/сут	1.25–3	1–2	1.2–4.7	0.49–0.77	3–11.75	3.3–6.7	0.25–0.95	2.5–5	1.85–7.2	0.38–0.57	2.86–5.71	2.7–10.4	
Коэффициент пьезопроводности, 10 <sup>3</sup> м <sup>2</sup> /сут	125–300	100–200	120–470	409–612	100–200	120–470	222–752	100–200	120–470	334–479	100–200	120–470	
Открытая пористость, %	15–20	20–30	30–40	15–20	20–30	30–40	15–20	20–30	30–40	15–20	20–30	30–40	
Проточная пористость, %	50	60	80	50	60	80	50	60	80	50	60	80	
Пластовая температура, °С	39–44	61–63	72–80	48–54	57–65	76–84	47–53	58–64	74–82	48–54	57–65	76–84	
Пластовое давление, атм	120.6	171	205	170.2	187.9	204	169.7	170	237	176.5	190	225	
Напор, м	1229	1721	2085	1600	1750	1902	1674	1701	2233	1640	1770	2200	
Теплоёмкость, 10 <sup>6</sup> Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	песчаник	1.75	1.9	1.95	1.75	1.9	1.95	1.75	1.9	1.95	1.75	1.9	1.95
	алевролит	1.6	1.85	1.8	1.6	1.85	1.8	1.6	1.85	1.8	1.6	1.85	1.8
	аргиллит	1.65	1.6	1.7	–	–	–	1.65	1.6	1.7	1.65	–	–
	глины	–	–	–	1.9	1.95	2.0	1.9	1.95	2.0	1.9	1.95	2.0

Основные результаты моделирования приведены на рис. 3 и 4. Изменение температурного режима в системе происходит неравномерно как во времени, так и в пространстве. Постепенно возрастая, оно достигает максимума по истечению 10 000 сут. Такая закономерность прослеживается в обоих циклах эксплуатации, однако каждый из них характеризуется индивидуальными особенностями.

Так при «замкнутом» цикле эксплуатации, наиболее быстрый промыв пород охлаждёнными возвратными водами характерен для валанжинского водоносного комплекса, отличающегося небольшими мощностями отложений (в среднем около 300 м) и высокими фильтрационно-ёмкостными свойствами пород. Для апт-альб-сеноманского водоносного комплекса, несмотря на относительно хорошие коллекторские свойства водовмещающих пород, присуще наименьшее воздействие закачиваемых вод на исходную геотермическую обстановку, благодаря большой



**Условные обозначения:**



Песчаник



Алевролиты



Аргиллиты

Скважины:



Добывающая



Нагнетательная

Эксплуатационные пласты и их номера:



Добывающий

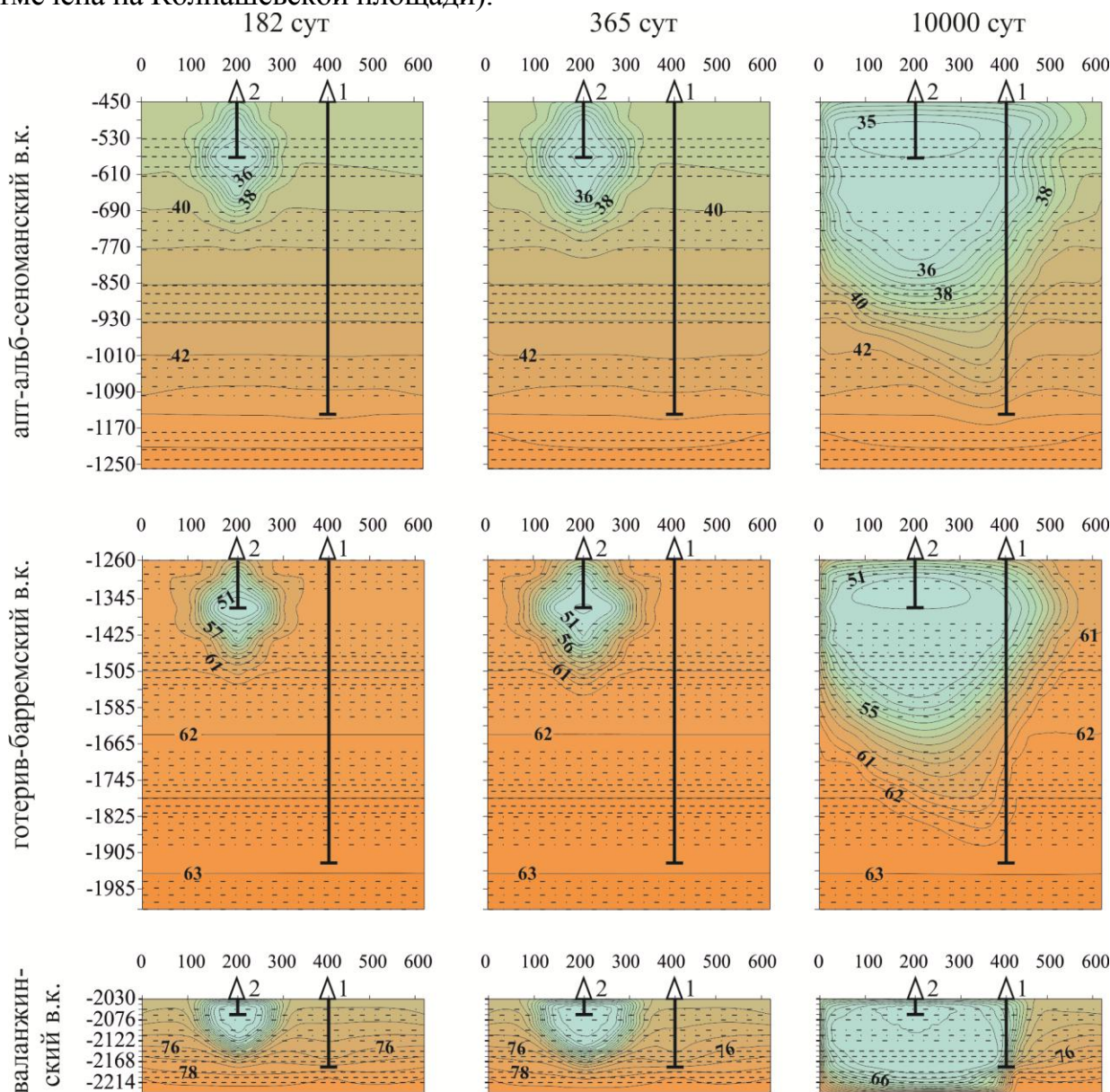


Нагнетательный

Рис. 2. Схема модели расчёта температурного изменения в водоносных комплексах на Колпашевской площади



мощности комплекса (до 800 м) и литологическому составу разреза, способствующих существенно более медленному воздействию закачиваемых вод. Более медленному воздействию, в сравнении с валанжинскими отложениями, будут подвержены подземные воды готерив-барремского комплекса, в котором, мощность отложений значительна, но их коллекторские свойства невысоки. Потеря температуры составляет для: апт-альб-сеноманского водоносного комплекса не более 0.2 °С; готерив-барремского – 0.1–2.9 °С (максимальное снижение приходится на Первомайскую площадь); валанжинского – 3.5–7.7 °С (максимальная потеря отмечена на Колпашевской площади).



Условные обозначения:

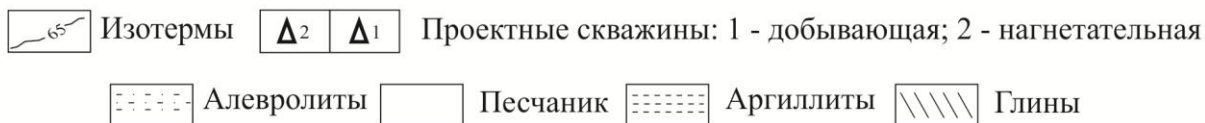


Рис. 3 Прогнозное изменение температуры меловых термальных подземных вод Колпашевской площади в разрезе (проекция XZ) по данным моделирования для «замкнутого» цикла эксплуатации

При «открытом» цикле эксплуатации наибольшие изменения температурного поля происходят в призабойных частях скважин (см. рис. 4). В нагнетательной скважине идёт нагрев подземных вод, за счёт перетоков отработанных вод (превышение температуры закачиваемых вод над пластовыми водами в среднем составляет 20 °С). В добывающей скважине наблюдается незначительное охлаждение, вызванное подтягиванием вод из вышележащих горизонтов с более низкой температурой. Потеря температур добываемых вод на исследуемых площадях составит для: Колпашевской – 2.4 °С, Первомайской – 0.9 °С, Оленьей – 0.9 °С, Южно-Черемшанской – 0.7 °С, при этом потери тепла не превысят 1–3 %.

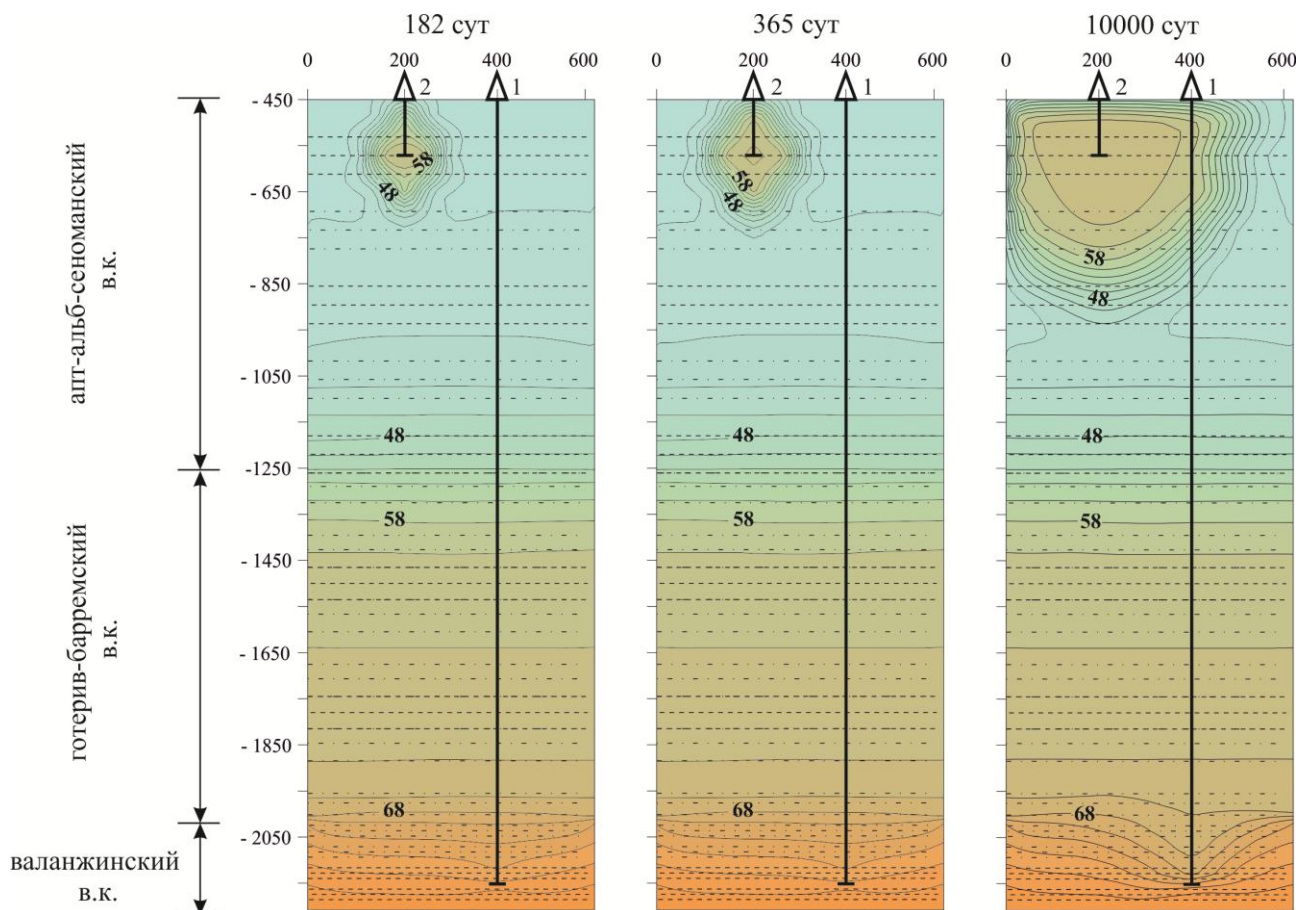


Рис. 4. Прогнозное изменение температуры меловых термальных подземных вод Колпашевской площади в разрезе (проекция XZ) по данным моделирования для «открытого» цикла эксплуатации (условные обозначения см. на рис. 3)

Моделирование показало, что при длительной эксплуатации, как в случае «замкнутого», так и «открытого» цикла, происходит постепенное увеличение влияния возвратных вод на более глубоко залегающие осадочные породы и подземные воды, выражающееся в незначительном снижении их температур. Для обоих циклов это связано, во-первых, с наличием в разрезе линз и прослоев глинистых пород, играющих роль не только водоупоров, но и теплоизоляторов, во-вторых, с мощностью водоносных комплексов, и в-третьих, с плановым размещением добывающей и нагнетательной скважин.

Прогнозные расчёты изменения температур подземных вод в процессе использования не исключают возможность их охлаждения, в связи, с чем при эксплуатации необходимо учитывать фильтрационно-ёмкостные свойства водовмещающих пород, мощность водоносных комплексов, время эксплуатации водозабора, а также расстояние между добывающей и нагнетательной скважинами. Более благоприятным с точки зрения использования подземных вод, является «открытый» цикл эксплуатации, поскольку в этом случае изменения температур минимальны.

***3. Эксплуатация термальных вод приведёт к природно-техногенному минералообразованию в стволе скважины и на водоподъёмном оборудовании. Состав и масштабы формирования вторичной фазы зависят от исходной минералообразующей способности термальных вод и степени изменения термобарических условий при их эксплуатации.***

Опыт использования термальных подземных вод других регионов России и зарубежных стран показал, что их эксплуатация сопровождается вторичным минералообразованием. Тем более это актуально для условий Томской области, где преимущественно распространены подземные воды с минерализацией свыше 1 г/л.

В целом характер изменения минерализации, и компонентов отвечающих за минерализационную способность, наиболее перспективных водоносных комплексов (апт-альб-сеноманского, готерив-барремского и валанжинского), имеет схожую тенденцию с изменением температур и направлен на увеличение значений в западном направлении в сторону прогиба Западно-Сибирского артезианского бассейна (рис. 5).

Использование термальных подземных вод приводит к нарушению пластовых условий, что может вызвать техногенное минералообразование, поэтому, прогноз состава и интенсивности отложения солей в стволе эксплуатационных скважин, является актуальным и имеет высокое практическое значение. В связи с этим было проведено моделирование системы термальная вода – вторичные минералы.

Расчёт солеотложения в стволе скважины проводился в гидрогеохимическом модуле программного комплекса «HydroGeo» для Колпашевской, Первомайской, Оленьей и Южно-Черемшанской площадей, отдельно по каждому из рассматриваемых водоносных комплексов. Исходный расчётный состав подземных вод приведён в табл. 5.

Физико-химическое моделирование основано на принципе равновесной термодинамики «по константам реакций», позволяющего, в отличие от многих подобных разработок, учитывать неидеальность растворов по методике, что особенно важно ввиду высокой солёности термальных вод Томской области. Данная методика позволяет учитывать плотность, общую минерализацию воды, газонасыщенность, состав водорастворённых газов, термобарические условия и другие показатели.

**Таблица 5. Исходный состав подземных вод**

Компоненты, мг/л	Площади											
	Колпашевская			Первомайская			Оленья			Южно-Черемшанская		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Na <sup>+</sup>	245.00	1610.04	1967.15	3760.00	5120.01	5320.11	4454.95	4830.44	5799.01	3720.10	4596.33	6560.10
K <sup>+</sup>	1.18	15.9	17.0	66.0	108.2	123.1	103.5	123.0	154.1	38.8	91.1	115.1
Ca <sup>2+</sup>	18.8	163.9	249.6	1328.6	1617.59	2438.68	1332.6	1547.1	2060.1	1442.8	1823.4	2148.2
Mg <sup>2+</sup>	1.50	3.10	6.20	91.21	103.74	126.50	89.99	102.10	161.70	81.43	139.85	267.50
Cl	786.5	2624.5	3312.2	10896.6	11714.6	14297.5	9538.5	10814.7	12801.1	9467.8	10620.1	13013.1
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	277.12	334.60	350.58	117.97	119.04	244.08	121.99	225.77	400.2	97.6	219.04	323
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.8	14.8	26.3	3.7	10.7	18.8	13.4	14.35	17.48	4.1	13.17	22.85
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	2.67	6.15	8.82	0.09	0.69	1.45	0.07	0.08	0.35	0.09	0.15	0
pH	7.2	7.8	7.9	6.3	6.5	6.75	6.3	6.4	6.7	6.4	6.5	6.6
M, г/л	2.18	4.83	5.85	16.81	18.4	20.26	15.7	18.01	22.3	14.78	18.18	21.86

*Примечание:* Водоносные комплексы: 1 – апт-альб-сеноманский; 2 – готерив-барремский; 3 – валанжинский.

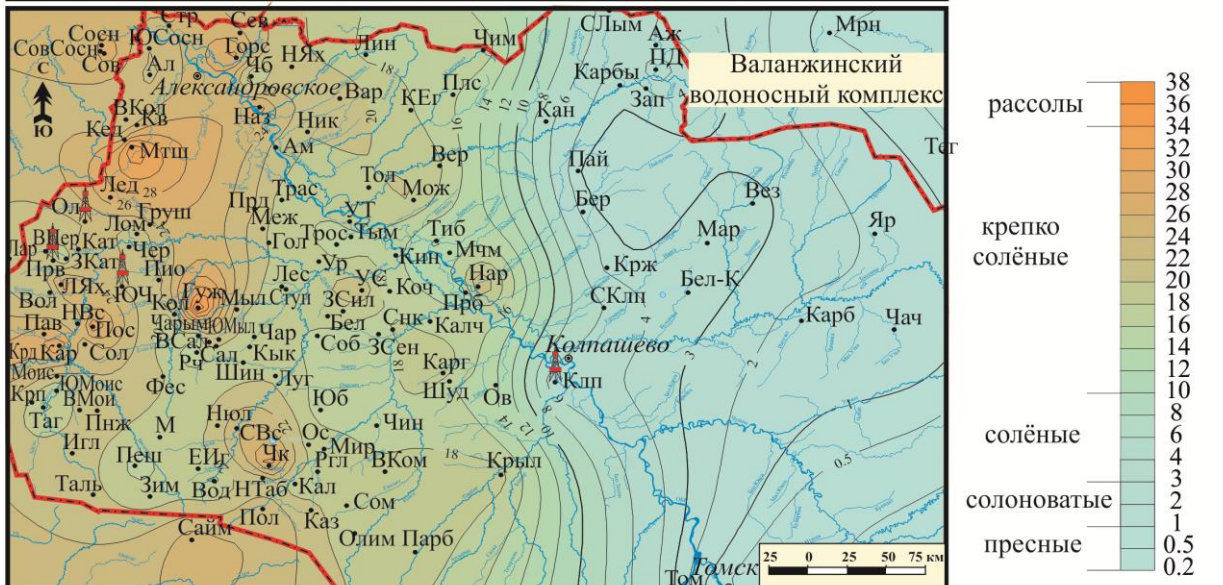
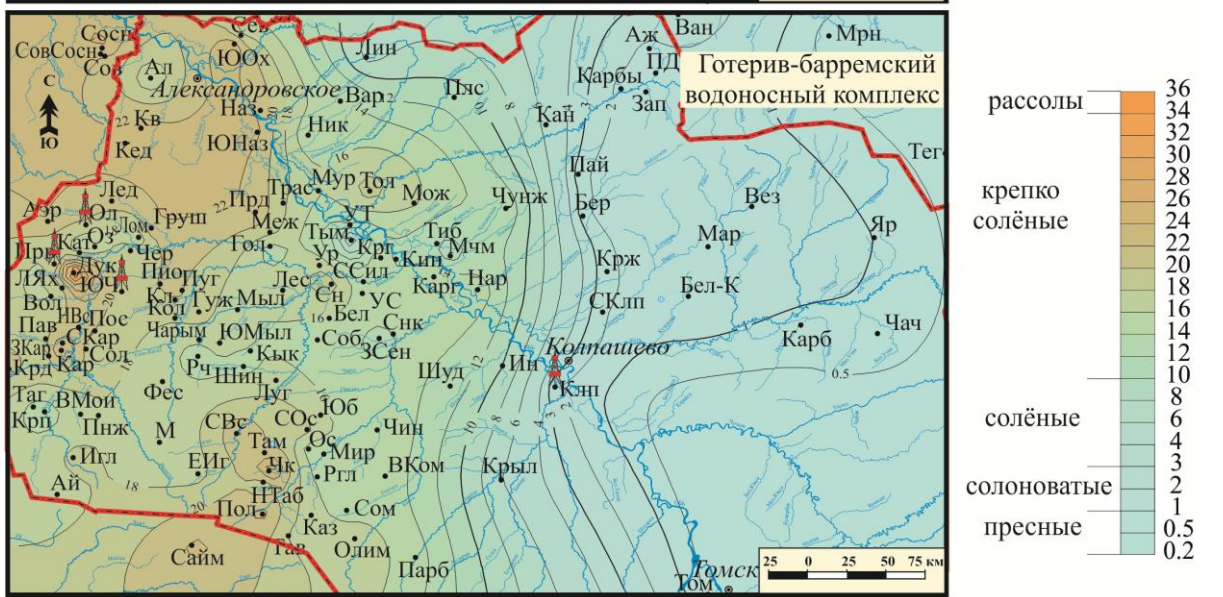
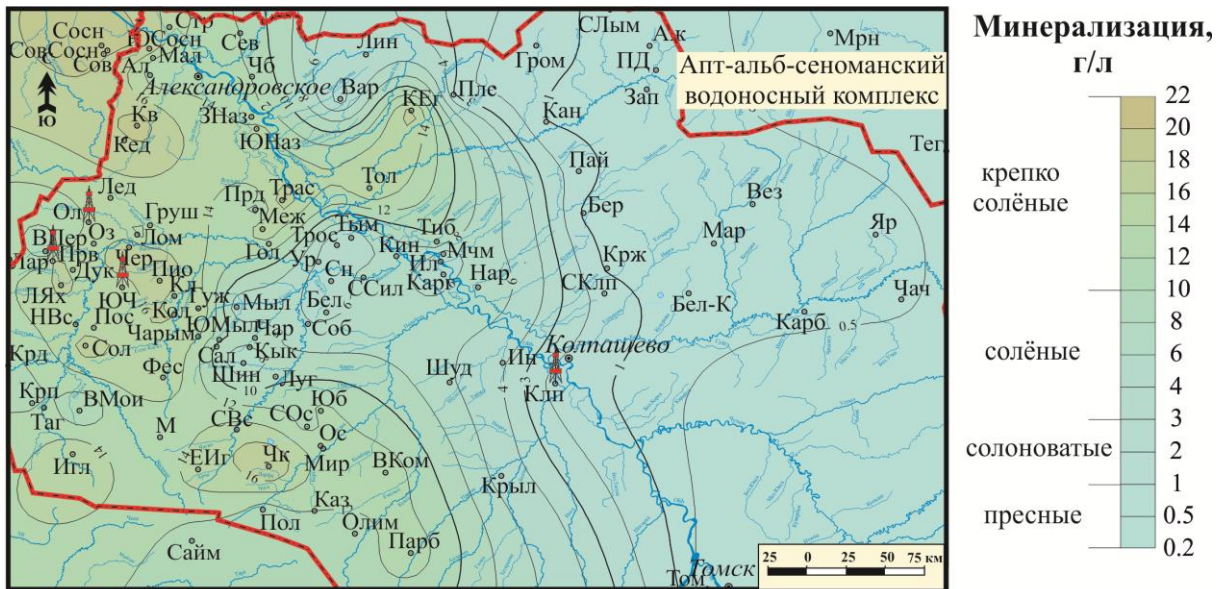
В процессе моделирования исходные данные (анализы вод) пересчитывались в соответствии с пластовыми условиями, раствор приводился в равновесие с газом (насыщение воды CO<sub>2</sub> из гипотетической свободной газовой фазы, содержащей 0.2 % CO<sub>2</sub>) и породой (путём приведения энергии Гиббса изучаемых вторичных минералов к состоянию равновесия с раствором, находящимся в пластовых термобарических условиях). Проведённая численная имитация подъёма вод по стволу скважины, вплоть до условий открытой поверхности соответствует гипотезе об исходном равновесии системы вода – вторичные минералы в пластовых условиях.

В качестве основных потенциальных минералов, способных выпадать в стволе скважины, согласно фактическим данным изучения осадков скважин, приняты: карбонаты – кальцит (CaCO<sub>3</sub>), арагонит (CaCO<sub>3</sub>), доломит (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>); силикаты и алюмосиликаты – халцедон (SiO<sub>2</sub>), кварц (SiO<sub>2</sub>), каолинит (Al<sub>4</sub>[Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>8</sub>), монтмориллонит (Al<sub>2</sub> [Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>] (OH)<sub>2</sub> · nH<sub>2</sub>O) и альбит (Na[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>]).

В ходе моделирования выяснилось, что в стволе скважин, добывающих термальные воды, интенсивность осаждения вторичных минералов происходит неравномерно, увеличиваясь с глубиной залегания водоносных комплексов, с преимущественным выпадением карбонатных минералов, и малым количеством алюмосиликатных минералов (рис. 6). Отметим, что данная особенность фиксировалась ранее и прямыми наблюдениями Вологдиной И.В. и др.

Солеотложение карбонатных минералов сопровождается выпадением на Колпашевской площади кальцита, с добавлением в готерив-барремском комплексе доломита (см. рис. 6). На Оленьей, Первомайской и Южно-Черемшанской площадях выпадают арагонит и доломит, с добавлением кальцита. Как говорилось ранее максимальное количество выпавших минералов характерно для валанжинского водоносного комплекса, и составляет порядка 16–20 мг/л.





**Условные обозначения**

- Изоминеры
- Площади
- Населенные пункты
- Реки
- Граница Томской области
- Площади детального изучения

Рис. 5 Изоинеры подземных вод меловых отложений Томской области



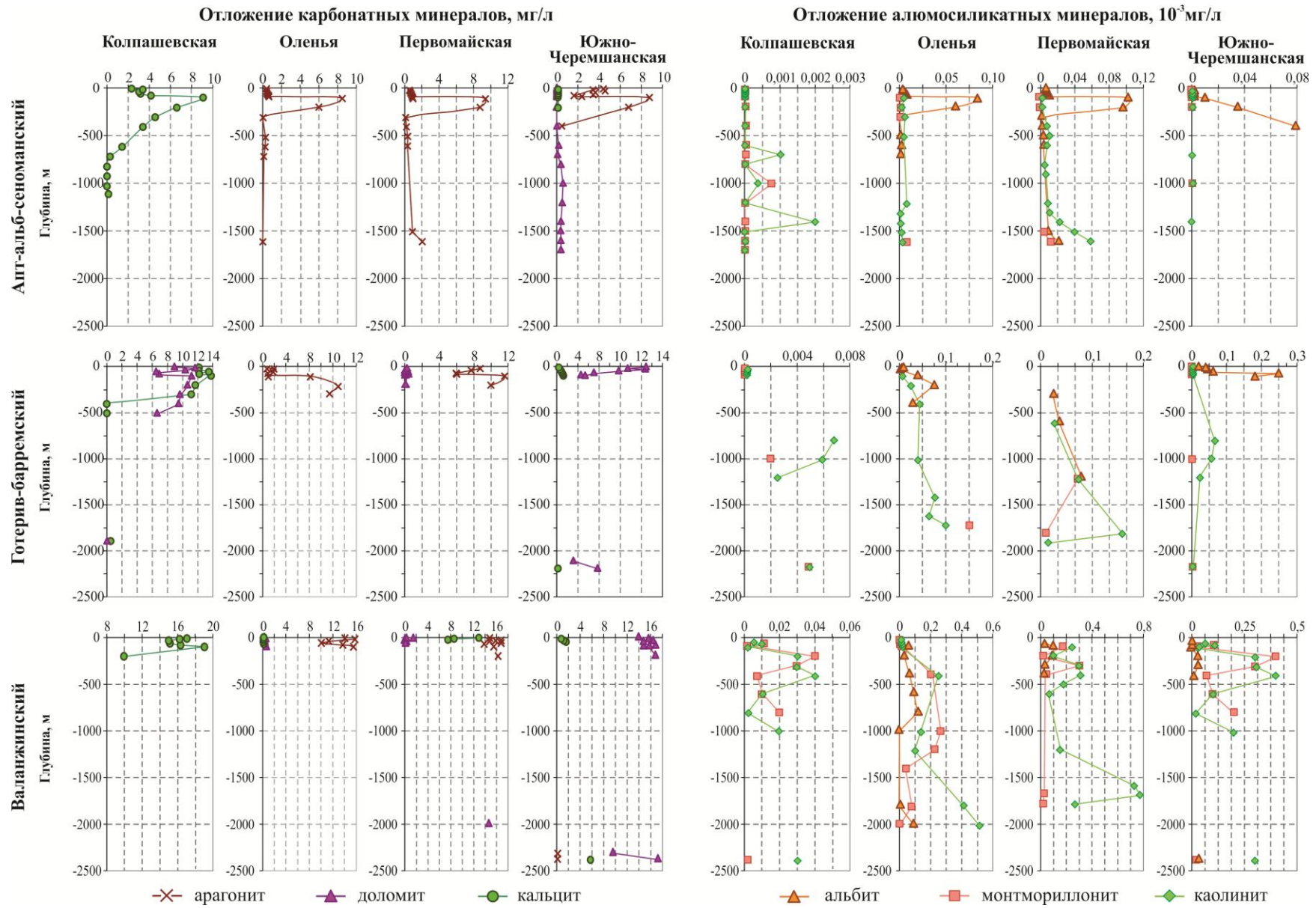


Рис. 6 Профили прогнозного отложения вторичных минералов в стволе скважины при подъёме воды из водоносных комплексов



Масштабы осаждения алюмосиликатных минералов значительно меньше, и составляют порядка  $(0.002-0.8) \cdot 10^{-3}$  мг/л. На Колпашевской площади алюмосиликатные минералы представлены монтмориллонитом и каолинитом, на Оленьей, Первомайской и Южно-Черемшанской площадях к ним добавляется альбит (см. рис. 6).

Выпадение минеральной фазы обуславливается, главным образом, изменением давления, следствием чего является частичная дегазация, повышение рН вод и их перенасыщение относительно рассматриваемых минералов. Выпадение минералов не приводит к смене химического типа вод, тогда как показатель кислотно-щелочных свойств среды рН и содержание компонентов, участвующих в выпадении соответствующих минералов, могут существенно изменяться.

Проведённое моделирование показало, что основными причинами солеотложения в добывающих скважинах являются их исходный химический состав в пластовых условиях и процессы дегазации термальных вод вследствие снижения давления в ходе их подъёма в стволе добывающих скважин.

### **Заключение**

В результате анализа геологических, гидрогеологических и тектонических условий территории Томской области, а также состава и особенностей гидродинамики термальных подземных вод установлено, что в их строении и распространении отмечаются следующие закономерности: 1) распространение термальных подземных вод имеет зональный характер, 2) увеличение температур идёт от краевых частей Западно-Сибирского артезианского бассейна к центральным областям и по глубине залегания.

Прогнозные эксплуатационные запасы термальных подземных вод в пределах рекомендованных площадей (Колпашевской, Южно-Черемшанской, Оленьей и Первомайской) для апт-альб-сеноманского, готерив-барремского и валанжинского водоносных комплексов, являются обеспеченными, и на их основе возможно создание ГеоТЭС, замкнутых по обороту теплоносителя.

Проведённое моделирование показало, что:

1) в процессе эксплуатации термальных подземных вод, как в случае «замкнутого», так и «открытого» цикла, происходит постепенное увеличение влияния возвратных вод на более глубоко залегающие осадочные породы и подземные воды, выражающееся в незначительном снижении их температур;

2) в процессе эксплуатации термальных подземных вод в стволе скважин происходит вторичное техногенное минералообразование, с выпадением карбонатных минералов и незначительным количеством алюмосиликатов.

## Статьи в журналах рекомендованных ВАК:

1. **Мищенко, М.В.** Ресурсы термальных вод Колпашевской площади [Текст] / М.В. Мищенко // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – С. 34–38.
2. **Мищенко, М.В.** Прогноз изменения температур при эксплуатации термальных вод Колпашевской площади Томской области [Текст] / М.В. Мищенко, М.Б. Букаты // Вестник Томского государственного университета – 2009. – № 327 – С. 233–239.
3. **Мищенко, М.В.** Моделирование изменения температур подземных вод Южно-Черемшанской площади Томской области [Текст] / М.В. Мищенко, М.Б. Букаты, Е.М. Дутова // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 167–172.

## Публикации в других научных изданиях:

4. **Мищенко, М.В.** Гидрогеотермальные условия района с. Чажемто [Текст] / М.В. Мищенко // Проблемы геологии и освоения недр: Труды VI Международного симпозиума им. ак. М.А. Усова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – С. 154–155.
5. **Мищенко, М.В.** Нетрадиционные возобновляемые и вторичные потенциальные источники энергии Томской области [Текст] / М.В. Мищенко // Проблемы геологии и освоения недр: Труды VI Международного симпозиума им. ак. М.А. Усова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 188–189.
6. **Мищенко, М.В.** Геохимическая характеристика термальных подземных вод Александровского района Томской области [Текст] / М.В. Мищенко // Материаловедение, технологии и экология в III тысячелетии: Материалы II Всероссийской конференции молодых учёных. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 171–173.
7. **Мищенко, М.В.** Геохимическая характеристика подземных вод Парабельского района [Текст] / М.В. Мищенко // Проблемы геологии и освоения недр: Труды VIII Международного симпозиума им. ак. М.А. Усова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 258–259.
8. **Мищенко, М.В.** Геотемпературные условия Томской области и перспективы использования термальных вод [Текст] // Гидрогеология, инженерная геология и гидрогеоэкология: Материалы конференции, посвящённой 75-летию кафедры ГИГЭ Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – С. 274–282.
9. **Мищенко, М.В.** Термальные подземные воды Томской области [Текст] / М.В. Мищенко // Энергетика: экология, надёжность, безопасность: Труды 11-ой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 140–143.
10. **Мищенко, М.В.** Геотермальные ресурсы подземных вод Колпашевской площади [Текст] / М.В. Мищенко // Подземная гидросфера: Материалы

Всероссийского совещания по подземным водам востока России. – Иркутск, 2006. – С. 285–288.

11. **Мищенко, М.В.** Прогноз вторичного солеотложения при эксплуатации термальных вод Колпашевской площади (Томская область) [Текст] / М.В. Мищенко // Проблемы геологии и освоения недр: Труды X Международного симпозиум им. ак. М.А. Усова. Т.1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 136–137.

12. **Мищенко, М.В.** Ресурсы термальных вод Колпашевской площади [Текст] / М.В. Мищенко // Проблемы геологии и освоения недр: Труды X Международного симпозиум им. ак. М.А. Усова. Т.1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 137–139.

13. **Мищенко, М.В.** Ресурсы термальных вод Южно-Черемшанской площади Томской области [Текст] / М.В. Мищенко // Трофимуковские чтения. – Новосибирск, 2007. – С. 48–51.

14. **Мищенко, М.В.** Гидрогеологические условия Южно-Черемшанской площади Томской области [Текст] / М.В. Мищенко // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XI Международного симпозиума им. ак. М.А. Усова – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 153–155.

15. **Мищенко, М.В.** Ресурсы термальных вод Первомайской площади Томской области [Текст] / М.В. Мищенко // Трофимуковские чтения. – Новосибирск, 2007. – С. 207–209.

16. **Мищенко, М.В.** Ресурсы термальных вод Оленьей площади Томской области [Текст] / М.В. Мищенко // Наука и инновации XXI века: Материалы VIII конференции молодых учёных. Т.1. – Сургут: Изд-во СурГУ, 2008. – С. 39–41.

17. **Мищенко, М.В.** Прогноз изменения температур при эксплуатации термальных вод Оленьей площади Томской области [Текст] / М.В. Мищенко // Подземные воды востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России – Тюмень: Тюменский дом печати, 2009. – С. 432–434.

18. **Мищенко, М.В.** Изменения теплового поля на Первомайской площади в процессе эксплуатации подземных вод [Текст] / М.В. Мищенко // Строение литосферы и геодинамики: Материалы XXIII Всероссийской молодёжной конференции. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. – С. 241–243.

19. **Мищенко, М.В.** Прогноз изменения температур при эксплуатации термальных вод Южно-Черемшанской площади Томской области [Текст] / М.В. Мищенко // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIII Международного симпозиума им. ак. М.А. Усова – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 211–213.