

## УРАН ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ, ИЛИ КАК ПРЕОДОЛЕТЬ УРАНОВЫЙ КРИЗИС

В.А. Домаренко<sup>1</sup>, Е.А. Воробьев<sup>2</sup>, Ю.Б. Миронов<sup>3</sup>, Е.В. Перегудина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, г. Томск, viktor\_domarenko@mail.ru

<sup>2</sup>ГФУГП "Урангео", г. Москва, vorobjev@urangeo.ru

<sup>3</sup>ФГУП ВСЕГЕИ, yuri\_mironov@vsegei.ru

## URANIUM IN THE EASTERN MARGIN OF WESTERN SIBERIAN PLATE, OR HOW TO OVERCOME CRISIS OF URANIUM

V.A. Domarenko<sup>1</sup>, E.A. Vorobyev<sup>2</sup>, Yu.B. Mironov<sup>3</sup>, E.V. Peregudina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk

<sup>2</sup>Federal state unitary geological enterprise "Urango", Moscow

<sup>3</sup>Federal state unitary enterprise "A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute" (VSEGEI)

Теоретические построения [5], свидетельствующие о катагенно-осадочном, эксфильтрационном происхождении железных руд Западно-Сибирского бассейна являются дополнительным фактором принципиальной возможности глубинного происхождения не только радиоактивных металлов, но и ванадия, марганца, благородных металлов и железа.

Theoretical constructions [5], which provide evidence of catagenic-aqueous, exfiltration origin of ores of Western Siberian basin, are an additional attribute of principal opportunity for deep-seated origin of not only radioactive metals, but also of vanadium, manganese, noble metals and ferrum.

Со времен СССР отечественная урановая минерально-сырьевая база продолжает оставаться TERRA INCOGNITA как для геологических кругов России, так и, к сожалению, для тех, кто определяет сырьевую стратегию страны. Между тем, уран исключен из списка стратегических видов полезных ископаемых по Постановлению Правительства Российской Федерации от 2 апреля 2002 г. №210. Очевидно, наше Правительство считает, что ресурсы урана в России несметны и никаких проблем с ними не предвидится. Эта идея даже заложена в "Энергетическую стратегию России на период до 2030 года". Реальность далека от столь радужной картины. Попытаемся оценить ее с глобальных позиций.

Для общемирового оборота ядерного топлива в последнее десятилетие характерен резкий дефицит производства природного урана, покрываемый из складских запасов и вторичных источников. Мировое потребление урана постоянно растет, с 1993 по 2002 гг. оно увеличилось с 50 до 67 тыс. т в год (на 34%). А производство урана за счет его добычи из недр в этот период оставалось на уровне 32–35 тыс. т в год.

Дефицит производства урана в течение всех этих лет покрывался, в основном, за счет складских запасов и экспорта из стран СНГ и, в первую очередь, – из России. Неконтролируемый экспорт урана из России являлся, по-видимому, одной из главных причин, определяющих парадоксально низкий уровень мировых цен на уран, опустившихся в 1998 г. до 22,75 долл./кг. В настоящее время мировая рыночная конъюнктура находится на переломе, обусловленным тем очевидным обстоятельством, что к 2020 г. существенно истощатся разведанные запасы урана в главных странах-производителях – Канаде и Австралии. Чуткий барометр мировых цен уже почувствовал надвигающееся сырьевое "ненастые" – с 2003 г. цены медленно поползли вверх.

Россия ощутит сырьевой урановый кризис гораздо

раньше 2020 г., т.к. в ближайшие 7–8 лет она превратится из экспортера природного урана в его импортера.

Годовая потребность России в уране, с учетом выполнения международных обязательств по обеспечению топливом АЭС, построенных за рубежом по российским проектам, составляет около 15 тыс. т в год. Годовое производство урана составляет только около 3 тыс. т в год. Оно обеспечивается единственным уранодобывающим предприятием – АО "Приаргунское производственное горно-химическое объединение" (АО "ППГХО") в Читинской области. Около 70% потребности страны в природном уране удовлетворяется за счет складских резервов, созданных в бывшем Советском Союзе. Исчерпание этих резервов следует ожидать к 2010 г.

Возможности роста мощностей уранодобывающей промышленности в перспективе до 2020 г. и далее остаются крайне ограниченными. АО "ППГХО" работает на пределе своих возможностей и на неуклонно ухудшающейся минерально-сырьевой базе. Промышленность может задействовать в указанный период не более двух новых добывающих предприятий на основе технологии СПВ (скважинного подземного выщелачивания) с общей годовой производительностью не выше 1000–1500 т урана на базе ранее открытых некрупных месторождений т.н. "палеодолинного типа" в Курганской области и Республике Бурятия. Этот прирост добычи урана не может изменить общую крайне негативную многолетнюю тенденцию с обеспеченностью сырьем отечественных АЭС, не говоря уже об экспортных возможностях страны [1].

Упомянутая "Энергетическая стратегия России на период до 2020 года", одобренная Правительством РФ в мае 2003 г., не сбалансирована с состоянием собственной урановой минерально-сырьевой базы. Сегодня в России эксплуатируется 30 ядерных энергоблоков на 10 АЭС с общей установленной мощностью более 22 ГВт,

выработавших в 2002 г. 141,3 млрд кВт/ч (16% от общего производства электроэнергии в России). В последние годы, начиная с 1998 г., весь прирост выработки электроэнергии в стране (около 8 млрд кВт/ч ежегодно) обеспечивает атомная энергетика. "Энергетической стратегией..." предусматривается до 2011 г. завершить строительство и ввести в действие 6 новых энергоблоков с установленной мощностью 6 ГВт, а к 2020 г. – удвоить установленные мощности АЭС с достижением производства электроэнергии 300 млрд кВт/ч (23% от общего производства электроэнергии). Планируется также развитие производства тепловой энергии от атомных энергоисточников до 30 млн Гкал/год. "Громадьё" этих планов опирается на ошибочное представление о том, что природные кладовые урана полны, запасы урана в них разложены по полочкам и занесены в амбарные книги.

Крупнейшие в мире запасы урана в недрах, разведанные в СССР, с распадом державы оказались, в основном, за рубежами России. Запасы урана в недрах Российской Федерации составляют около 180 тыс. т, однако по своим качественным показателям они значительно уступают зарубежным (Канада, Австралия, Казахстан). Среди них рентабельные для промышленного освоения запасы (т.н. "активные" запасы) составляют менее 30%. Основная их часть сосредоточена на территории деятельности АО "ППГХО". Разведочные работы за счет средств государственного бюджета с 1985 г. практически прекращены. АО "ППГХО" за счет своих средств проводит в небольших объемах работы по доразведке флангов и глубоких горизонтов эксплуатируемых месторождений, наращивая запасы урана на первые сотни тонн, что не решает проблемы одновременной обеспеченности предприятия сырьем. Даже если завтра геологи обнаружат новое крупное сверхрентабельное урановое месторождение, до 2020 г. роста разведанных запасов урана в российских недрах ожидать не приходится, т.к. от открытия уранового месторождения до его передачи добывающей промышленности проходит 15–20 лет.

Есть ли у геологов шансы на скорое открытие таких месторождений?

Россия занимает 7-е место в мире по разведанным запасам урана в недрах (около 180 тыс. т). Первые места занимают: Австралия (более 894 тыс. т), Казахстан (681 тыс. т) и Канада (507 тыс. т). Государственным балансом запасов урана России учтены запасы 16 месторождений, из которых 15 сосредоточены в одном районе – Стрельцовском в Забайкалье и пригодны под горный способ добычи. Одно месторождение, расположенное в Зауралье, пригодно для добычи способом скважинного подземного выщелачивания.

Государственным балансом учтены также запасы 38 урановых месторождений, относимые к забалансовым. Среди последних выделяется запасы Эльконского и Ергенинского урановорудных районов, рассматриваемые как резервные. Так, в Эльконском районе в Республике Саха (Якутия) запасы урана количественно превосходят (более 200 тыс. т) все балансовые запасы в стране, но из-за рядового качества руд они могут стать рентабель-

ными только при цене на уран, превосходящей 80 дол./кг.

Таким образом, современное состояние урановой минерально-сырьевой базы России может быть оценено как критическое, требующее немедленной и энергичной государственной помощи, прежде всего, в части финансирования геологоразведочных работ.

Однако Россия, получившая в наследство от СССР скудную и низкокачественную МСБ урана, обладает высокими и достаточно надежными перспективами коренного ее улучшения. Прогнозные ресурсы урана, утвержденные Министерством природных ресурсов РФ около 600 тыс. т при цене не выше 80 долл./кг, но для их подтверждения требуются значительные объемы геолого-разведочных работ.

Основными направлениями этих ГРП являются: поиски, оценка и подготовка к эксплуатации месторождений т.н. "палеодолинного типа" и месторождений, связанных с региональными зонами пластового окисления (ЗПО) пригодных для отработки способом подземного выщелачивания урана (ПВ); поиски, оценка и подготовка к эксплуатации месторождений с рудами повышенного качества и, в первую очередь, месторождений т.н. "типа несогласия", составляющих основу урановой сырьевой базы Канады и Австралии.

На территории России определены три крупных урановорудных района палеодолинного типа – Зауральский, Западно-Сибирский и Витимский, в которых практически завершены прогнозно-геологические исследования, выделены, ранжированы и частично изучены перспективные площади под поиски месторождений урана под ПВ, выявлены, частично оценены и подготовлены под промышленное освоение урановые месторождения т.н. "палеодолинного типа". Общие прогнозные ресурсы урана в этих районах составляют 278 тыс. т.

Учитывая широкий общий фронт рекомендуемых ГРП, можно поставить ожидаемую результативность ГРП в прямую зависимость от их объемов (главным образом, бурения) и, следовательно, от вложения финансовых средств.

В Западно-Сибирском урановорудном районе с начала 70-х годов силами ГПП "Березовгеология" Первого главка (современная "Урангеологразведка" в усеченном виде проводятся прогнозно-геологические и поисково-оценочные работы, направленные на выявление гидрогенных (под ПВ) урановых месторождений в связи с региональными ЗПО и палеодолинами мезозойско-кайнозойского возраста. Здесь выявлены Малиновское, Пригородное и Смоленское урановые месторождения и 6 рудопроявлений урана гидрогенного типа. Прогнозные ресурсы урана в палеодолинах оцениваются в 40 тыс. т. Однако они не решают проблему расширения МСБ урана.

Перспективы района на уран могут быть связаны с выявлением новых структурных обстановок и новых промышленно-генетических типов месторождений региональных зон пластового окисления, пока не имеющих аналогов в мировой практике [2]. В случае получения положительных результатов в связи с региональными ЗПО ресурсы могут быть увеличены в десятки и сотни раз.

Нами в процессе выполнения программы МПР РФ "Оценка ураноносного потенциала обрамления Западно-Сибирской плиты" выявлены некоторые факторы, которые на наш взгляд позволяют под несколько иным углом зрения взглянуть на историю геологического развития внутренних районов Западной Сибири, ее геологическое строение и закономерности размещения полезных ископаемых, в том числе урана.

Выявлена исключительно слабая буровая изученность междуречья Обь-Енисей, что предопределило низкий уровень достоверности картографического материала. Достоверность материала, полученного по данным бурения структурно-поисковых скважин на нефть конца 50-х – начале 60-х годов XX в. оставляет желать лучшего, так как выход керна по ним составляет не более 15%. Геологическая интерпретация проводилась по результатам электрокаротажа и не всегда корректна. При документации керна практически нигде не указывается окраска пород, которая является важным индикатором физико-химических и геохимических преобразований горных пород. Гамма-каротаж проводился не по всем скважинам не специализированными организациями, не заинтересованными в получении достоверных результатов. Часть скважин остановлена с пиками по гамма-каротажу на забое, что не допустимо с точки зрения современных требований. Партией массовых поисков, тем не менее обнаружены ряд аномальных концентраций, которые, как нам представляется, были неверно проинтерпретированы. Проверить это можно только бурением с получением качественного кернового материала по интересующим интервалами серьезными петрогеохимическими исследованиями.

Изученный в далеком не полном объеме материал, особенно по гидрогеологическому строению и геологическим особенностям региона позволяют выявить некоторые закономерности и сделать предварительные выводы.

**1.** В пределах Обь-Енисейского междуречья по данным гидрогеохимического районирования отчетливо выделяются три гидрогеохимические зоны по всему разрезу осадочного чехла, соответствующие смене палеофациальных обстановок:

- западная зона, в основном развитая на левобережье р. Оби с водами существенно хлоридного состава;
- восточная – развитая в основном на правобережье р. Оби простирающаяся вплоть до р. Енисей с водами существенно гидрокарбонатного состава.

Границей между зонами являются отложения с водами смешанного хлоридно-гидрокарбонатного состава. Ширина полосы, смешанных простирающихся в субмеридиональном направлении (с осью в районе г. Колпашево достигает 150–200 км.

Количество хлоридов в воде в пределах этой полосы резко меняется от 1500–3000 до 10–20 мг/л, т.е. от рассолов до нормальных пресных вод. В этих же зонах отмечается перераспределение газов в воде, валового железа и других параметров.

Зона смешанных вод на уровне меловых (верхнемеловых) отложений в первом приближении совпадает со

сменой литофаций от субконтинентальных через прибрежно-морские к абиссальным, с одной стороны, и к границе распространения железоносных отложений известного Западно-Сибирского железорудного бассейна. Последнее обстоятельство является на наш взгляд важным рудоконтролирующим и рудо локализирующим фактором.

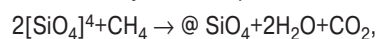
Подтверждением этому являются те немногочисленные аномалии, найденные нами в архивах, а также данные полевых наблюдений (Трубачевское проявление урана, аномалии по 0,01% в верхнемеловом горизонте на Кетском профиле структурно поискового бурения, аномальные повышения по гамма каротажу на Парбигском и Обском профилям. В пределах этой же зоны отмечаются аномальные концентрации урана в воде до  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  г/л, повышенные концентрации урана в углях до 0,4% (Усманское проявление, выявленное предшественниками) и до 0,04% (Усть-Тымское проявление – наши данные).

Косвенным свидетельством смены геохимической обстановки являются данные, полученные при интерпретации наземных полевых радиометрических, гамма-спектрометрических и ТЛД-наблюдений. В пределах переходной зоны с запада на восток резко снижается значение общей радиоактивности, содержания урана (по радио), наблюдается интенсивное перераспределение тория и дифференциация торий/уранового отношения. Дифференцируются и аномалии ТЛД.

Наиболее ярко проявлена изменчивость суммарного показателя коэффициентов корреляции надфоновых концентраций радиоэлементов и калия (индекс Лященко –  $I_L$ ), который в пределах переходной зоны принимает резко аномальные значения при практически нулевых значениях на флангах. Для объяснения причин такого явления необходимы дополнительные исследования.

**2.** Наличие переходной зоны или зоны градиентов, а по большому счету барьерной зоны приурочено, по нашему мнению, к восточной границе Западно-Сибирского юрско-нижнемелового нефтегазоносного бассейна и совпадает с Западно-Сибирским железорудным поясом, расположенным на границе смены палеофациальных обстановок от континентальной на восток до прибрежно-морской и морской на западе. Известно, что на периферии нефтегазоносных бассейнов отмечаются месторождения рудных полезных ископаемых, в том числе Mo, V, Ca, Sr, Mn, Fe и другие компоненты, в том числе U. При этом не исключается механизм элизионного перетока и эксфильтрационный характер оруденения.

Теоретические основы механизма эпигенетического и, в какой-то мере, эксфильтрационного рудообразования заложены в работах Б.А. Лебедева и др. [4], Г.В. Комарова [3], Адамса [7], И.Г. Печенкина [6], и других исследователей. В частности, Б.А. Лебедев теоретически обосновал химизм процесса взаимодействия углеводородов и породы, принципиальная формула которого выглядит следующим образом:



то есть при взаимодействии углеводородов с алюмосиликатной породой образуется некоторое количество

кремнекислоты, воды и углекислоты. Последние, как известно, являются достаточно агрессивной средой и при благоприятных условиях могут выщелачивать и переносить металлы.

В ходе наложенного эпигенеза происходит перераспределение вещества и пустотного пространства. Обычно это сопровождается суммарным уменьшением общей пористости, но нередко при возрастании доли эффективных пустот. Последнее играет решающую роль при миграции флюидов, особенно вертикальной. Определяющее значение имеет поступление в осадочный чехол из фундамента углекислоты. Взаимодействие  $\text{CO}_2$  с породами происходит с образованием, с одной стороны, пород с повышенной эффективной пористостью – вместилищ подавляющей части подвижных жидкостей, а с другой, – пород с крайне низкой пористостью, но повышенной трещинной проницаемостью, по которым преимущественно происходит миграция флюидов в условиях аномально-высоких пластовых давлений. В частности, в терригенных разрезах наиболее высокая трещиноватость типична для зон наложенной карбонатизации (которые суть не что иное, как следы миграции  $\text{CO}_2$ ).

Формирование в осадочных бассейнах как залежей нефти и газа, так и стратиформных залежей эпигенетических руд генетически взаимосвязано, поскольку оба процесса обусловлены наложенным эпигенезом. С этих позиций механизмы нефтегазонакопления и рудообразования весьма схожи:двигающийся по эффективному пустотному пространству агрессивный флюид взаимодействует с вмещающими породами, производя их боковые изменения с перераспределением вещества, после чего эффективный коллектор, в том числе новообразованный, заполняется полезными компонентами (углеводородами в нефтегазоносных бассейнах или рудными минералами в рудоносных бассейнах или в рудоносных частях нефтегазоносных бассейнов).

Важное различие этих процессов состоит в характере движущегося флюида: металлоносного водного раствора в рудогенезе и углеводородного (безводного) флюида в нафтогенезе. Преобладание того или другого типа мигрирующих флюидов причинно связано со стадией развития бассейна и с интенсивностью тектонических движений.

На ранних этапах преимущественного прогибания осадочного бассейна движение вод крайне медленное и обусловлено их постепенным отжатием при уплотнении пород. Именно на этих этапах широко проявляется миграция углеводородных смесей, в основном обусловленная компрессионной энергией растворенного газа (определяющей в том числе возникновение аномально-высоких пластовых давлений). Это приводит к формированию промышленных залежей нефти и газа в крупных антиклинальных структурах.

На поздних этапах региональных воздыманий при широком развитии дизъюнктивных нарушений происходит раскрытие гидродинамически замкнутых систем, и в миграцию вовлекаются колоссальные массы пластовых соленых вод,двигающихся как за счет компрессионного механизма (как и в случае углеводородных флюидов), так и за счет эксфильтрационного механизма. В

итоге нефтегазонакопление и эпигенетическое рудообразование разделены как во времени жизни осадочного бассейна, так и в пространстве. Формирование эпигенетических руд происходит преимущественно в воздымающихся раскрытых частях осадочных бассейнов, а формирование залежей нефти и газа в наиболее гидродинамически изолированных частях бассейнов, надежно экранированных региональными покрывками.

Увеличение интенсивности тектонических подвижек приходится для Западно-Сибирского бассейна на верхнемел-палеогеновое время, после формирования основных залежей железных руд или близко одновременно с ними. Это приводило к частичному раскрытию системы и элизионному перетоку растворов из областей высоких давлений в области низких, т.е. к поверхности. Области разгрузки рудоносных растворов могут являться железоносные горизонты, горизонты, обогащенные органикой и т.п. сорбенты.

Следует заметить, что существуют теоретические построения [5], свидетельствующие о катагенно-осадочном, эксфильтрационном происхождении железных руд Западно-Сибирского бассейна, что является дополнительным фактором принципиальной возможности глубинного происхождения не только радиоактивных металлов, но и ванадия, марганца, благородных металлов. Железо Колпашевского, Нарымского и Бакчарского горизонтов могло служить физико-химическим барьером для рудоносных растворов как эксфильтрационных,двигающихся со значительных глубин, так и инфильтрационных движущихся с юго-востока, со стороны Алтае-Саяна и с востока – со стороны Енисейского кряжа. Косвенным свидетельством тому являются аномалии по гамма-каротажу в некоторых скважинах, пересекающих железоносные отложения. Протяженность выявленной барьерной зоны около 6 тыс. км.

Для заверки теоретических представлений необходимо проведение и комплексных прогнозно-геологических исследований с большим объемом структурно-поискового бурения исследований. При получении положительных результатов возможно резкое, в десятки и сотни раз, увеличение ураноносного потенциала России.

### Литература

1. *Оценка ураноносного потенциала Западно-Сибирской плиты и ее складчатого обрамления.* – *Геохимия и рудообразование радиоактивных, благородных и редких металлов в эндогенных и экзогенных процессах* / В.А. Домаренко, Е.А. Воробьев и др. // *Материалы Всероссийской конференции с иностранным участием, посвященной 80-летию Ф.П. Кределева.* – Улан-Удэ, 2007. – С. 64–69.
2. *Комарова Г.В. Гидрогенные месторождения урана. Основы теории рудообразования.* – М.: Атомиздат, 1980. – С. 230–246.
3. *Влияние эпигенетических процессов на параметры коллекторов и покрывок в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности* / Б.А. Лебедев, Г.Б. Аристова, Е.Г. Бро и др. – Л.: Недра, 1976. – 132 с.
4. *Павлов Д.И. Зоны катагенной разгрузки подземных вод*

- нефтегазоносных бассейнов и осадочный рудогенез // Геология рудных месторождений. – 1995. – Т. 37, № 2. – С. 122–131.
5. Печенкин И.Г., Грушевой Г.В. Металлогения ураносных осадочных бассейнов Евразии. – М.: РИС "ВИМС", 2015. – 224 с.
6. Adams S.S., Saucier A.E. *GeoIogy and recognition criteria for uraniferous humate deposits Grants Uranium Region, New Mexico, final report 1981 / prepared for the U.S. Department of Energy Grand Junction. – Colorado. – P. 9–12, 24–59–63, 70–119.*

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЯ-7 В НИЖНИЕ СЛОИ АТМОСФЕРЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЕГО НАКОПЛЕНИЯ В РАСТЕНИЯХ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ

С.В. Дружинин, Г.П. Киселев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики Российской академии наук, Архангельск, Россия, druzhininsegr@yandex.ru

## FEATURES INTAKE OF BERYLLIUM-7 IN THE LOWER LAYERS OF THE ATMOSPHERE AND REGULARITY OF ITS ACCUMULATION IN PLANTS IN THE NORTHWEST OF RUSSIA

S.V. Druzhinin, G.P. Kiselev

Federal Research Centre for Integrated Study of the Arctic of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

The article contains research data cosmogenic radionuclide  ${}^7\text{Be}$  in air aerosols, precipitation and vegetation in the North – West of Russia.  ${}^7\text{Be}$  activity ranges from 0,07 to 2,51 mBq/m<sup>3</sup> in air aerosols and from 0,03 to 12,9 Bq/l in precipitation. Plants accumulate radionuclide  ${}^7\text{Be}$  during the growing season. His activity reaches significant values up to 600 Bq/kg by the end of the growing season in the upper parts of plants mainly and depends on the number dropped during the growing season precipitation.

Бериллий-7 ( ${}^7\text{Be}$ ) – радиоактивный изотоп космогенного происхождения с периодом полураспада 53,22 дня [20]. В природных условиях  ${}^7\text{Be}$  впервые был обнаружен американскими исследователями в атмосфере в начале 50-х гг. прошлого века [19]. Ими же показан механизм образования  ${}^7\text{Be}$  в атмосфере, связанный с воздействием космических лучей.

Основные ядерные реакции, приводящие к образованию  ${}^7\text{Be}$  в атмосфере Земли, протекают при взаимодействиях первичных и вторичных космических лучей с атомами азота и кислорода в стратосфере (70%) и тропосфере (30%), когда происходят так называемые реакции скалывания  ${}^7\text{N}^{14}(\rho, X) {}_4\text{Be}^7$ ,  ${}^8\text{O}^{16}(\rho, X) {}_4\text{Be}^7$ ,  ${}^7\text{N}^{14}(n, X) {}_4\text{Be}^7$  и  ${}^8\text{O}^{16}(n, X) {}_4\text{Be}^7$  [13, 22, 24].

Поступление в земную атмосферу первичных космических лучей (в основном протонов) высоких энергий вызывает в атмосфере ряд ядерных превращений с образованием большого числа вторичных лучей, которые в свою очередь порождают другие ядерные реакции. Один протон с энергией  $>10^{14}$  эВ может создать  $10^6$ – $10^9$  вторичных частиц, такой каскад покрывает большую территорию, и это явление называется широким атмосферным ливнем. Оно было открыто русским физиком, академиком Д.В. Скобельцыным с помощью камеры Вильсона в 1929 г. [6, 14, 15]. В каскаде ядерных реакций широкого атмосферного ливня существует большая вероятность образования  ${}^7\text{Be}$ .

В работах авторов [3, 4, 13, 16, 17, 21–24] сообщается, что скорость образования  ${}^7\text{Be}$  в атмосфере зави-

сит от высоты, широты местности, а также изменяется в соответствии с одиннадцатилетними циклами солнечной активности, которые модулируют поток космических лучей через магнитное поле Земли. Образуюсь в стратосфере и верхних слоях тропосферы, атомарный  ${}^7\text{Be}$  окисляется и быстро адсорбируется на аэрозолях субмикронного размера. Запас  ${}^7\text{Be}$  в атмосфере оценивается величиной  $1,8 \cdot 10^{17}$  Бк, что соответствует значению около 810 атомов/м<sup>2</sup>·с, а средняя концентрация в тропосфере составляет 12,5 мБк/м<sup>3</sup>. На земную поверхность  ${}^7\text{Be}$  в основном попадает в виде "сухих" (с аэрозолями воздуха) и "мокрых" (с атмосферными осадками) выпадений [3, 4, 13, 16, 17, 21–24]. Таким образом, образовавшись в верхних слоях атмосферы, он вместе с аэрозолями воздуха и атмосферными осадками попадает на поверхность Земли и включается в компоненты природной среды.

В работе Безуглова с соавторами [2] показаны фотоядерные реакции образования  ${}^7\text{Be}$  в атмосфере, полученные экспериментальным путем. В их работе экспериментально рассматриваются реакции  ${}^6\text{C}^{12}(\gamma, X) {}_4\text{Be}^7$ ,  ${}^7\text{N}^{14}(\gamma, X) {}_4\text{Be}^7$ ,  ${}^8\text{O}^{16}(\gamma, X) {}_4\text{Be}^7$  и говорится, что этот путь образования  ${}^7\text{Be}$  до недавнего времени не учитывался. Как утверждают авторы работы [2], фотопроизводство  ${}^7\text{Be}$  имеет значительный вклад в поток радионуклида на поверхность Земли независимо от широты местности, при этом значительное его количество образуется на малых высотах.