

тов из глубоких горизонтов (более 4,5 км) могут характеризоваться хорошей изоляцией от поверхностных агентов деструкции.

В регионах гипергенного выветривания также преобладают нетрадиционные ловушки. Как правило, это неструктурные залежи сложного комбинированного типа, часто тектонически-экранированные в связи с образованием поднадвиговых зон выклинивания и литологического замещения. Аномальное же обогащение нефтей зоны гипергенеза V, Ni, Mo, Re, Cd, Hg, U и другими элементами, вплоть до промышленных рудных концентраций, может объясняться их биодеградацией, выветриванием, потерей лёгких масляных УВ фракций, и соответственно накоплением МЭ.

Основным источником нефти в залежах кристаллического фундамента является ОВ нефтематеринских осадочных толщ, облекающих выступы фундамента. Именно поэтому, геохимические особенности флюидов месторождений фундамента подчиняются тем же закономерностям, что и нефти, залегающие в осадочных толщах бассейна и обрамляющие их.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме: «Развитие научно-методических основ поисков крупных скоплений УВ в неструктурных ловушках комбинированного типа в пределах платформенных нефтегазоносных бассейнов», АААА-А19-119022890063-9.

Библиографические ссылки

1. *Конторович А. Э.* Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. М. : Недра, 1976.

2. *Пунанова С. А.* Геохимическая парадигма при прогнозе качества нефтей в ловушках комбинированного строения // Материалы Международ. науч.-практ. конф. «О новой парадигме развития нефтегазовой геологии». Казань : Ихлас, 2020. С. 119–122.

3. *Пунанова С. А.* Прикладная металлогения нафтидов [Электрон. ресурс] // Актуал. проблемы нефти и газа. 2017. Вып. 2(17). С. 1–12. URL: http://oilgasjournal.ru/issue_17/punanova.pdf (дата обращения: 1.12.2021).

4. *Жильцова А. А., Исаев В. И., Коржов Ю. В.* Миграция углеводородных флюидов геохимический метод индикации залежей // Регион. проблемы. 2010. Т. 13, № 1. С. 11–17.

5. *Шустер В. Л., Пунанова С. А.* Перспективы нефтегазоносности глубокозалегающих юрских и доюрских отложений севера Западной Сибири в нетрадиционных ловушках // Георесурсы. 2021. № 23(1). С. 30–41.

6. *Пунанова С. А., Самойлова А. В.* Прогноз фазового состояния залежей углеводородов в ловушках комбинированного строения [Электрон. ресурс] // Актуал. проблемы нефти и газа. 2021. Вып. 2(33). С. 15–27. URL: <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-33.art2> (дата обращения: 1.12.2021).

7. *Dolson J., He Zhiyong, Horn B. W.* Advances and Perspectives on Stratigraphic Trap Exploration-Making the Subtle Trap Obvious // Search and Discovery. Art. N 60054. 2018. June 18.

УДК 622

ВЫЗВАННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТОКСИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЛАНЦЕВЫХ ТОЛЩ

С. А. Пунанова¹, М. В. Родкин^{1,2}

¹Институт проблем нефти и газа РАН,

ул. Губкина 3, 119333 Москва, Российская Федерация; punanova@mail.ru

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация; rodkin@mitp.ru

В докладе рассматриваются экологические риски, наблюдаемые при разработке сланцевых формаций. Негативные последствия и ущерб окружающей среде приносят возникающие при горизон-

тальном бурении и гидроразрыве пласта как процессы вызванной сейсмичности, так и загрязнения окружающей среды потенциально токсичными элементами. При неучёте этих геоэкологических последствий добыча сланцевых углеводородов может оказаться нерентабельной.

Ключевые слова: добыча сланцевых углеводородов; экологические опасности; вызванная сейсмичность; загрязнение окружающей среды; потенциально токсичные элементы.

The report examines the environmental risks observed in the development of shale formations. Negative consequences and damage to the environment are caused by both the processes of induced seismicity and environmental pollution with potentially toxic elements arising from horizontal drilling and hydraulic fracturing. If these geocological consequences are not taken into account, the extraction of shale hydrocarbons may turn out to be unprofitable.

Key words: production of shale hydrocarbons; environmental hazards; caused by seismicity; environmental pollution; potentially toxic elements.

Уже более 20 лет наблюдается рост добычи сланцевых углеводородов (УВ). Суммарные мировые ресурсы LTO – light tight oil (легкая нефть, нефть низкопроницаемых пластов) составляют более 30 млрд т, из которых 35 % приходится на США и 34 % на Россию (рис. 1) [1]. Добыча LTO в США составила в 2019 г. около 350 млн т, в России – менее 1 млн т.

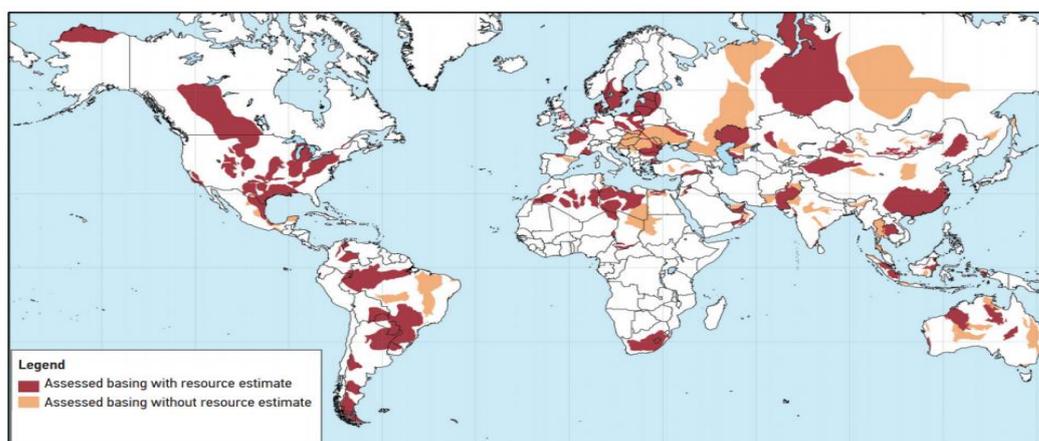


Рис. 1. География распределения ресурсов LTO [1]

Запасы категории unproved technically recoverable resources (млрд т): в США – 10,7; России – 10,2; Китае – 4,4; Аргентине – 3,7; Канаде – 1,2.

Экологические риски, связанные с вызванной сейсмичностью. Нарастание добычи сланцевых УВ сопровождается ростом опасности от вызванной сейсмичности. Существование сильного триггерного воздействия технологий добычи сланцевых УВ на локальную сейсмичность может считаться надёжно установленным, хотя масштабы воздействия и магнитуды максимально возможных вызванных землетрясений и остаются не ясными.

Проблема связи процессов нефтедобычи с сейсмичностью не нова. Доказанным считается опасный рост сейсмичности в связи с эксплуатацией гигантского газового месторождения Гронинген в Нидерландах [2]. Это месторождение было открыто в 1959 г., и оно долгое время оставалось основой газоснабжения этого региона. Первое привлекавшее внимание землетрясение ($M_L = 2,4$) произошло здесь в 1991 г.; сильнейшее пока землетрясение ($M_L = 3,6$) произошло в 2012 г. Ранее регион полагался асейсмичным, и потому даже и слабые землетрясения вызвали панику и даже нанесли определённый ущерб. Землетрясения не прекращались, и в 2015 г. было принято решение об ограничении добычи. В 2018 г. произошло ещё одно относительно сильное землетрясение, и было принято решение к 2030 г. закрыть это некогда крупнейшее в Европе месторождение.

Добыча нефти и газа обычным способом вызывает изменения порового давления в исходном порово-трещинном пространстве. Технология добычи сланцевых УВ основана на производстве массовых гидроразрывов и образовании многочисленных новых систем трещин в исходно слабопроницаемых породах. Опасность развития вызванной сейсмичности при этом представляется существенно выше. И действительно, в связи с добычей в США и Канаде сланцевых УВ наблюдается сильная вызванная сейсмичность [1, 3]. Заметим, однако, что и в этом случае предлагались альтернативные объяснения, что слабая сейсмичность ранее просто не фиксировалась, и что рост числа землетрясений более связан с их тщательной регистрацией, чем с реальным ростом сейсмичности. Такое мнение, однако, опровергается тем, что сильный рост числа слабых землетрясений отмечается и в тех случаях, когда регистрация слабых землетрясений была достаточно полной и до начала разработки сланцевых УВ. Критики развития вызванной сейсмичности указывают также, что землетрясения часто возникают в стороне от скважин закачки. Это последнее замечание представляется существенным в плане обсуждения эффективности применяемых в настоящее время методик снижения опасности от вызванной сейсмичности.

В настоящее время в целях предупреждения ущербов от вызванной сейсмичности широко используется т. н. метод «семафора» [1, 3]. Так, например, в пров. Альберта (Канада), если землетрясение с магнитудой $M2+$ происходит не далее 5 км от скважины закачки, то «загорается жёлтый свет» и реализуется план тщательного мониторинга ситуации. Если же далее в этой же области происходит землетрясение с магнитудой $M4,0+$, то загорается красный свет – разработка сланцевых УВ прекращается и может возобновиться только после специального разрешения.

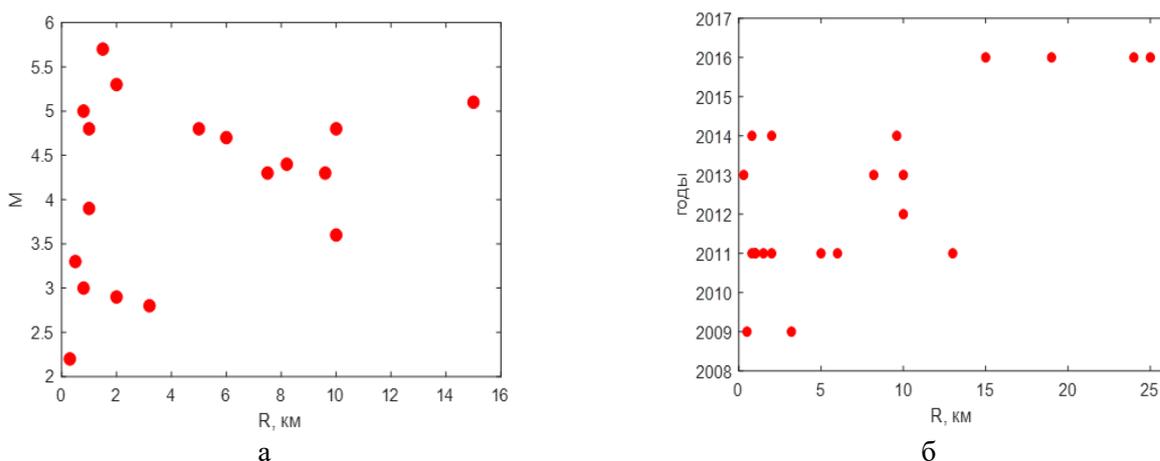


Рисунок 2 – Параметры сильнейших вызванных землетрясений

а – связь магнитуды (M) максимального события и расстояния (R) от источника возмущения; б – расстояния (R) и времени (годы) максимального события.

Опыт регистрации вызванной сейсмичности указывает, однако, на дискуссионность такого метода обеспечения сейсмической безопасности. Далеко не единичны (как уже отмечалось выше) случаи, когда вызванная сейсмичность возникает не только в непосредственной близости от скважин. Так, например, в [4] рассмотрен случай развития вызванной сейсмичности в окрестности нагнетательной скважины на Северном Сахалине. Землетрясения в области соседнего разлома возникли здесь позднее близко расположенных к скважине событий. Данные по наиболее сильным вызванным землетрясениям в США [1, 3, 5] подкрепляет эти опасения. На рис. 2а, б представлены соотношения между магнитудой сильнейших (предположительно) вызванных землетрясений и временем и расстоянием до сильного воздействия. Видно, что для относительно более сильных землетрясений довольно типично возникновение

на большем расстоянии от нагнетающей скважины. Время задержки так же может оказаться при этом довольно большим. Все эти случаи фактически не учитываются при оценке риска по методике типа «семафор».

Результаты анализа закона повторяемости вызванных землетрясений подкрепляют эти опасения (рис. 3). По данным для предположительно вызванных землетрясений района активной добычи сланцевых УВ (шт. Оклахома, США) хорошо видно, что типичный наклон графика повторяемости землетрясений (показан красными линиями с одинаковым наклоном) наблюдается в диапазонах магнитуд примерно до $M = 3,3$ и выше $4,5$. В интервале же магнитуд от $3,3$ до $4,5$ угол наклона графика повторяемости аномально велик, указывая на быстрое уменьшение вероятности реализации событий в этом интервале магнитуд. Можно предположить, что диапазон до $M = 3,3$ представлен весьма многочисленными, но слабыми чисто техногенными вызванными землетрясениями; при этом вероятность возникновения более сильных таких землетрясений оказывается относительно много ниже, чем для типичной тектонической сейсмичности (график повторяемости становится более крутым). Однако, для землетрясений с $M > 4,5$ график повторяемости снова выполаживается. Такие более сильные и потому много более опасные землетрясения видимо являются уже природно-техногенными и порождаются антропогенной активизацией уже существовавших ранее (хоть может и не выявленных) тектонически нагруженных разломов.

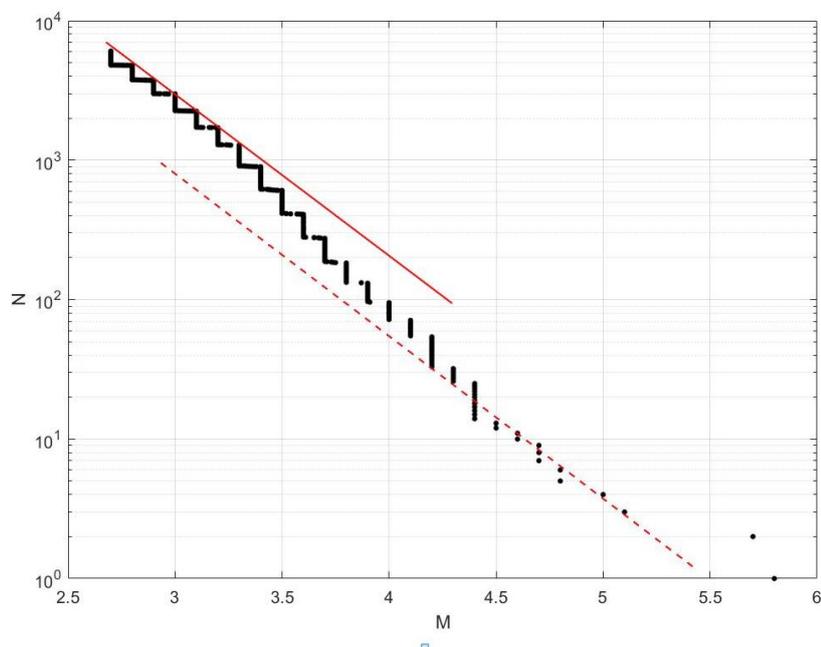


Рисунок 3 – Характер повторяемости землетрясений для случая предположительно вызванной сейсмичности области активной добычи сланцевых УВ (шт. Оклахома, США)

На основании вышеизложенного получаем, что применяемые в настоящее время ограничения на добычу сланцевых УВ, принятые с целью уменьшения ущерба от вызванной сейсмичности, по-видимому, не вполне адекватны ситуации. Часть предположительно сильных техногенных землетрясений не только не попадают в зону, стандартно полагаемых вызванных землетрясений (например, «землетрясение с магнитудой $M \geq 2$ в пределах 5 км от места закачки»), но даже не попадают под ограничение «не далее 15 км от скважины», что иногда использовалось как «строгий» критерий вызванной сейсмичности. Реальная сейсмическая опасность в значительной степени определяется природными условиями, в частности, расположением и свойствами ближайших разломных зон. Опасный сейсмический эффект реально оказывается более кумулятивным, долгосрочным и удалённым, чем это предполагается

в рамках существующих подходов к снижению опасности от вызванной сейсмичности по методике «семафора».

Экологические риски, связанные с загрязнением окружающей среды потенциально токсичными элементами. Многими исследователями неоднократно отмечалось негативное влияние разработки сланцевых формаций при добыче из них УВ-сырья (особенно методами горизонтального бурения с применением гидроразрыва пласта (ГРП)), наносящей колоссальный вред окружающей среде. Экологические риски выражались в следующих проблемах: 1) технология требует огромных запасов воды, для одного ГРП используется от 5 000 до 20 000 т смеси воды, песка и химикатов, а таких ГРП производится десятки в год на одной скважине; 2) вблизи месторождений скапливаются большие объёмы отработанной загрязнённой химическими веществами воды, которая неизбежно попадет в почву, уничтожая её плодородие и загрязняя подземные воды; 3) добыча сланцевого газа приводит к значительному загрязнению грунтовых вод толуолом, бензолом, диметилбензолом, этилбензолом, мышьяком и другими опасными веществами; 4) для одной операции ГРП используется 80–300 т химикатов до 500 наименований; 5) вероятность загрязнения радиоактивными веществами, которые будут выноситься на поверхность в результате добычи сланцевого газа. Однако, при разработке и добыче нефтегазовых ресурсов сланцевых формаций необходимо учитывать не только перечисленные риски, но и обогащённость концентрирующимися в них металлами и неметаллами (рис. 4) [6, 7].

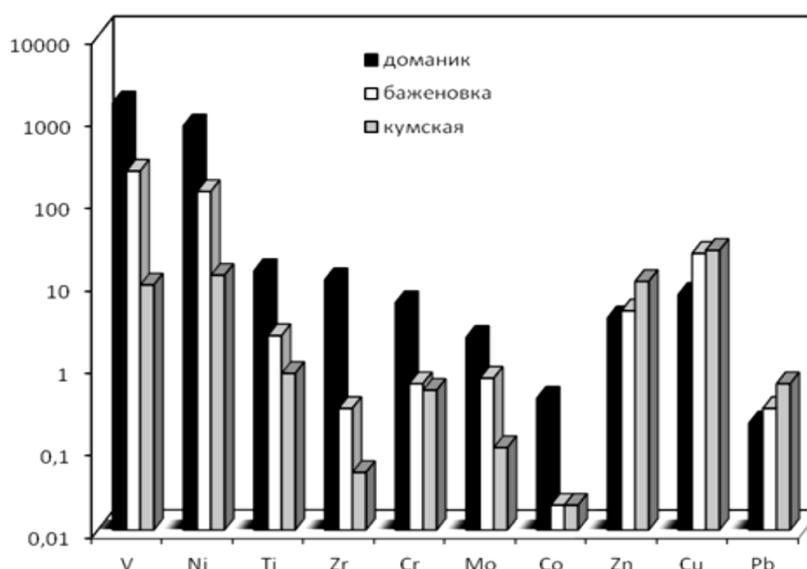


Рисунок 4 – Концентрация ТЭ в органическом веществе сланцевых формаций (доманик Волго-Урала, баженовская свита Западной Сибири, кумская свита Предкавказья), мг/кг По аналитическим данным [7].

Около 15–20 % добываемого УВ-сырья уже содержит в своём составе токсичные элементы (ТЭ) в количествах, превышающих их безопасный уровень, и объёмы его добычи с годами возрастают. Поэтому содержания таких ТЭ, как Cd, Hg, As, Se, Mo и др. необходимо оценивать на предварительных этапах разработки любых месторождений УВ, в т. ч. и сланцевых. Тепловое воздействие на пласт, увеличение давления, закачка химических реагентов при гидроразрыве пласта при большом количестве перфораций на протяжении длинного горизонтального участка приводят к высвобождению элементоорганических соединений, возможно, летучих металлов и их выбросу в окружающую среду. Лабораторное моделирование также подтвердило факт потери нафтидами ТЭ при высоких температурах и перехода их в

окружающую среду, либо при сорбции на породах вместе со смолисто-асфальтовыми компонентами, либо за счёт разрушения металлоорганических соединений [8]. Проблема весьма усугубляется строением формации, т. н. «условными ловушками» сланцевых пород, представляющими собой многокилометровые обогащённые УВ прослои, а также проведением многократных воздействий на пласт с закачкой пропантов и жидкости под давлением и при высокой температуре. Всё это способствует образованию большой площади новых трещин и путей перетока флюидов. Соответственно опасность попадания ГЭ в окружающую среду оказывается намного больше [9].

Заключение. Расширяющаяся практика разработки сланцевых УВ ставит вопрос о сопутствующих их извлечению геологических рисков. В первую очередь эти риски касаются возникновения вызванной сейсмичности и опасности загрязнения окружающей среды содержащимися в сланцевых породах ГЭ. Принятые процедуры «семафора», призванные минимизировать отрицательные воздействия вызванной сейсмичности, слабочувствительны к возникновению землетрясений, относительно более удалённых по времени и расстоянию от нагнетательных скважин. При этом такие землетрясения могут оказаться относительно более сильными и более опасными. Такие события, по сути, являются природно-техногенными землетрясениями, а не чисто техногенными, как подавляющее большинство слабых событий, происходящих в непосредственной близости от нагнетательных скважин.

Рекомендовано для контроля экологической ситуации на сланцевых месторождениях при вводе их в разработку и принятии решения о технологии переработки сланцев с извлечением газа, нефти и, возможно, металлов проведение дополнительных исследований по оценке (мониторингу) состава, как сланцевых отложений, так и добываемых из них УВ на предмет содержащихся в них ГЭ и опасности их перехода в окружающую среду (грунтовые и пластовые воды, почву, атмосферу).

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам: «Развитие научно-методических основ поисков крупных скоплений УВ в неструктурных ловушках комбинированного типа в пределах платформенных нефтегазоносных бассейнов», АААА-А19-119022890063-9 и «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)». АААА-А19-119013190038-2.

Библиографические ссылки

1. World Shale Resource Assessments. The U.S. Energy Information Administration (EIA) [Электрон. ресурс]. URL: <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/> (дата обращения 1.12.2021).
2. *Van Thienen-Visser K., Breunese J. N.* Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments [Электрон. ресурс] // *The Leading Edge*. 2015. Vol. 34, iss. 6. P. 664–671. URL: <https://doi.org/10.1190/tle34060664.1> (дата обращения 1.12.2021).
3. *Krupnick A., Echarte I.* Induced Seismicity Impacts of Unconventional Oil and Gas Development [Электрон. ресурс] // RFF Report. 2017. URL: https://media.rff.org/documents/RFF-Rpt-ShaleReviews_Seismicity_0.pdf (дата обращения 1.12.2021).
4. *Родкин М. В., Рукавишников Т. А.* Вызванная сейсмичность: серьёзная угроза добыче сланцевой нефти? [Электрон. ресурс] // *Актуал. проблемы нефти и газа*. 2018. Вып. 3(22). С. 1–11. URL: DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art39 (дата обращения 1.12.2021).
5. *Vorobieva I., Shebalin P., Narteaу C.* Condition of Occurrence of Large Man-Made Earthquakes in the Zone of Oil Production, Oklahoma // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. Vol. 56. N 6. P. 911–919.
6. *Пунанова С. А., Нукенов Д.* К вопросу об экологических последствиях горизонтального бурения сланцев в связи с их обогащённостью микроэлементами // *Георесурсы*. 2017. Т. 19, № 3. С. 239–248.
7. *Справочник по геохимии нефти и газа / Под ред. С. Г. Неручева.* СПб. : Недра, 1998.

8. Punanova S. A., Shpirt M. Ya. Ecological Consequences of the Development of Shale Formations Containing Toxic Elements // Solid Fuel Chemistry. 2018. Vol. 52, N. 6. P. 396–405.

9. Punanova S. Trace element composition of shale formations // 29th Int. Meet. on Organic Geochemistry (EAGE-IMOG). Sept. 2019, Gothenburg, Sweden. All Abstr. 2019. P. 495–496.

УДК 621.039

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПЛОЩАДКИ РОССИЙСКОГО ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (первый шаг – всегда самый сложный)

В. Н. Комлев

184209 Апатиты, Российская Федерация; komleva_ap@mail.ru

Приведён фрагмент дискуссии по проблеме захоронения радиоактивных отходов в России. В частности, высокоактивных и долгоживущих отходов на берегу Енисея. Рассмотрена горно-геологическая ситуация пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов по информации ФБУ «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики» и автора. Отмечены недостатки геологического изучения площадки будущего захоронения (поисковая и оценочная стадии, ОАО «Красноярская горно-геологическая компания»). Высказано предположение о необходимости государственной повторной экспертизы первичной и интерпретированной геологической информации по участку «Енисейский». Возможно, также возникнет необходимость аннулировать документы Федерального агентства по недропользованию (Роснедра), которые обосновывают и разрешают здесь строительство и эксплуатацию объекта для захоронения радиоактивных отходов. Поддержана рекомендация ФБУ «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых» о выполнении разведочной стадии геологического изучения данного участка.

Ключевые слова: геологическое захоронение радиоактивных отходов; могильник; безопасность; геологические технологии; подземное строительство; разведочные скважины; гидравлическая проницаемость пород; Росатом; участок «Енисейский»; Красноярский край; Россия.

A fragment of the discussion on the problem of radioactive waste disposal in Russia is given. In particular, highly active and long-lived waste on the banks of the Yenisei. The mining and geological situation of the deep disposal site for radioactive waste is considered according to the information of the Federal State Budgetary Institution (FSBI) «Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences» and the author. The drawbacks of the geological study of the future disposal site are noted (prospecting and appraisal stages, OJSC «Krasnoyarsk Mining and Geological Company»). An assumption was made about the need for state re-examination of the primary and interpreted geological information on the Yeniseisky site. It may also be necessary to cancel the documents of Federal Agency for Subsoil Use (Rosnedra), which justify and permit the construction and operation of a facility for the disposal of radioactive waste here. The recommendation of the FSBI «State Commission on Mineral Reserves» to carry out the exploratory stage of geological study of this area was supported.

Keywords: geological disposal of radioactive waste; waste storage facility; safety; geological technologies; underground construction; trial boreholes; hydraulic permeability rocks; Rosatom; Yenisei site; Krasnoyarsk region; Russia.

Введение. Россия планирует создать в Красноярском крае в пределах закрытого административного территориального образования (ЗАТО) Железногорск на участке «Енисейский» национальный/федеральный (минимум, если не учитывать возможность реализации некоторых тенденций [1]) ПГЗРО – пункт глубинного/геологического захоронения радиоактивных отходов (РАО) первого и второго классов опасности. Речь идет об объекте, у которого перспектива на миллион лет экологических тревог далеко не местного значения и на сотни миллиардов долларов затрат только в обозримом будущем. Ряд разрешительных документов уже