

УДК 621.039.7

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ВЫСОКОАКТИВНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ОТХОДОВ (НИЖНЕКАНСКИЙ МАССИВ)*



В. Н. ТАТАРИНОВ¹,
зав. лабораторией, д-р техн. наук,
v.tatarinov@gcras.ru



В. Н. МОРОЗОВ¹,
главный научный сотрудник,
проф., д-р техн. наук



Е. Н. КАМНЕВ²,
ученый секретарь, проф.,
д-р геол.-минерал. наук



А. И. МАНЕВИЧ¹,
научный сотрудник

¹ Геофизический центр РАН, Москва, Россия

² АО «ВНИПИПромтехнологии», Москва, Россия

Введение

Методологические основы изучения геодинамической безопасности объектов ядерного топливного цикла были заложены научной школой ВНИПИПромтехнологии, яркими представителями которой являются О. Л. Кедровский, А. Б. Зверев, Е. А. Котенко, В. Н. Мосинец и другие. В 1970–1990 гг. были разработаны эффективные проектные решения, в том числе по обеспечению безопасности ведения горных работ на сложно-структурных урановых месторождениях Заозерное, Восток, Антей, Ала-Таньга, Грачевское, Маныбай и др. Итогом этих работ стало создание геомеханической службы прогноза горных ударов при Минатоме СССР, научное руководство которой осуществляли ученые горного отдела 22. Накопленный опыт был использован затем в исследованиях по выбору участка для захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) в гранитогнейсовых породах Нижнеканского массива.

Обоснование долговременной безопасности (ОДБ) захоронения РАО – сложная междисциплинарная задача, решаемая последовательным выполнением ряда процедур, направленных на изучение свойств и процессов, происходящих в верхней части земной коры и влияющих на сохранность изоляционных свойств горных пород. Согласно международным и российским нормам [1–3], ОДБ строится на системе доказательств безопасности (Safety

Рассмотрены методологические аспекты исследований по оценке и прогнозу геодинамической устойчивости геологической среды в приложении к проблеме обеспечения безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов (РАО) в геологических формациях Нижнеканского массива (Красноярский край). На основании инструментальных наблюдений, математических моделей, системного анализа геопространственных данных проведено геодинамическое районирование и ранжирование структурных тектонических блоков по степени устойчивости северной части Нижнеканского массива. Показано, что устойчивость тектонических блоков существенно различается по своим кинематическим параметрам.

Ключевые слова: геодинамика, устойчивость геологической среды, движения земной коры, напряженно-деформированное состояние, навигационные спутниковые системы, радиоактивные отходы, Нижнеканский массив.

DOI: 10.17580/gzh.2021.03.05

case), которая включает в себя базу данных о строении, свойствах и процессах в геологической среде (Assessment basis) и результаты численного анализа опасностей (Safety assessment), связанных с эволюцией геологического барьера. Сложность связана с тем, что достоверных методов прогноза сохранности изоляционных свойств геологической среды на время радиобиологической опасности РАО (10 тыс. лет и более) пока нет ни в мировой, ни в отечественной научной практике.

В основе решения этой задачи лежит фундаментальное понятие – «устойчивость геологической среды», под которой понимается ее способность при природных и техногенных воздействиях сохранять или изменять свои инженерно-геологические свойства в таком диапазоне, который не приводит к смещениям, напряжениям и изменению внутренней структуры и выходу радионуклидов за пределы санитарной зоны на период их радиобиологической опасности [3]. Существенный вклад в изучение устойчивости геологической среды внес акад. М. А. Садовский, который подчеркивал, что важно выявить те дискретные термодинамические свойства среды, которые отражают ее неравновесность и способность к активности в будущем [4].

Оценка геодинамической устойчивости геологической среды

Исходя из этого система геодинамических исследований (рис. 1), лежащая в основе ОДБ Нижнеканского массива, включает в себя два взаимосвязанных направления [5–8]:

- оценка устойчивости, т. е. изучение и описание исходного геодинамического состояния выбранного района, участка и площадки строительства подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ);

* Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.



Рис. 1. Система геодинамических исследований по ОДБ участка Енисейский Нижнеканского массива

- прогноз устойчивости, т. е. системный анализ данных и построение математических моделей геодинамической эволюции среды на период времени 10 тыс. лет и более.

Цель заключается в установлении параметров, определяющих изоляционные свойства геологической среды на момент проведения исследований для различных иерархических уровней – район, участок, площадка. Работы включают в себя следующий комплекс работ.

1. Изучение структурной нарушенности района и участка Енисейский, выделение крупных тектонических блоков, линейментов, активных разломов, опасных геодинамических зон и т. д. с помощью космоснимков, анализа цифровой модели рельефа, геофизических, геоморфологических данных, бурения скважин и т. д.

2. Оценка сейсмической опасности, включая уточнение исходной сейсмичности (УИС) района, сеймотектонических условий района и участка Енисейский, проведение детального сейсмического районирования (ДСР), микросейсморайонирования (МКР), а также выполнение сейсмологического мониторинга (СМ) для выявления геодинамических и сеймотектонических зон и степени их активности.

3. Изучение современных движений земной коры (СДЗК) и деформаций в дальней и ближней зонах площадки ПИЛ с помощью геодезических методов (глобальные навигационные спутниковые системы – ГНСС, высокоточное нивелирование 1-го класса точности, РСА-интерферометрия).

В работах геологов В. М. Даденко, Р. М. Лобацкой, Д. В. Лопатина, Н. В. Лукиной, В. Л. Миловидова, О. А. Морозова и других, занимавшихся исследованием Нижнеканского массива, дается весьма неоднозначная трактовка геометрии и активности

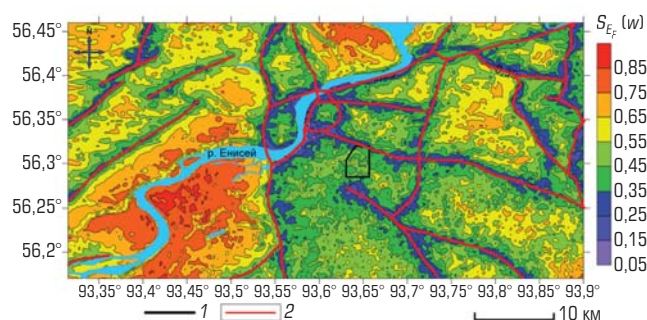


Рис. 2. Показатель геодинамической безопасности $S_{EF} (w)$, отн. ед.

1 – контур участка Енисейский; 2 – активные тектонические разломы

тектонических нарушений. Поэтому на начальной стадии работ для поиска структурных неоднородностей и признаков их тектонической активности были использованы математические геоинформационные алгоритмы дискретного математического анализа, кластеризации, искусственного интеллекта, нечеткой логики и др., разработанные в ГЦ РАН (научная школа акад. А. Д. Гвишиани) [9]. С их помощью была построена структурно-тектоническая модель Нижнеканского массива и проинтерпретированы данные аэромагнитной съемки (масштаб 1:200 000) методом деконволюции Эйлера (алгоритмы RODIN, Монолит) [5, 9]. Анализ аномального магнитного поля ΔT_a , отражающего особенности глубинного строения, показал, что в глубинном строении Нижнеканского массива преобладают изометричные структурные блоки со средними размерами 6–12 км [9]. Их границы частично совпадают с выделенными тектоническими нарушениями, однако около 30–40 % линейных аномальных зон не связаны с геологическими данными о разломах [10].

Структурный тектонический блок (СТБ), где строится ПИЛ, рассматривают как часть динамической системы, имеющей внутренние и внешние источники энергии, определяющие пространственно-временную эволюцию структуры и напряженно-деформированного состояния СТБ, которая отражается в особенностях геолого-геофизических полей и рельефа. Для районирования по устойчивости был создан алгоритм¹ расчета интегральной меры геодинамической безопасности $S_{EF} (w)$, учитывающий геоморфологию рельефа и плотность тектонических нарушений [11]. С его помощью была обработана цифровая модель рельефа SRTM-4, 1″×1″ (30×30 м), полученная по данным спутниковой радарной топографической съемки поверхности Земли. Пример расчета величины $S_{EF} (w)$ показан на **рис. 2**.

Видно, что территория делится на три категории участков:

- неустойчивые $S_{EF} (w) \leq 0,25$ – это преимущественно зоны разломов и те, где имеются резкие градиенты высот рельефа;
- промежуточные – переходные зоны, в большинстве случаев это участки, где один из параметров, входящих в расчет $S_{EF} (w) \in (0,25; 0,75)$;

¹ Расчеты проводили доктора физ.-мат. наук С. М. Агаян и И. В. Лосев.

- устойчивые $S_{E_f}(w) \geq 0,75$ – в основном равнинные участки на левом берегу р. Енисей и зоны с небольшим градиентом высот в центре структурных блоков.

В сейсмическом отношении район расположен на северной границе активного внутриконтинентального Алтай-Саян-Байкальского региона. Для него имеются данные о сейсмическом режиме, полученные по региональной сейсмической сети, но на локальном уровне таких данных нет. В 2018 г. силами Национального оператора «НО РАО» была организована локальная сеть сейсмологического мониторинга из 8 станций для получения информации о сейсмических событиях в ближней зоне ПИЛ. В ходе потоковой обработки за период 2018–2019 гг. было идентифицировано 463 сигнала от местных событий (радиус до ПИЛ – 300 км) и 1470 событий, очаги которых удалены от ПИЛ более чем на 300 км. Отсутствие сейсмических сигналов, источники которых расположены в радиусе менее 30 км от площадки, предварительно может свидетельствовать о стабильности тектонического режима.

Прогноз геодинамической устойчивости геологической среды

Прогноз устойчивости основан на экстраполяции характеристик (временных рядов) геологической среды на период времени более 10 тыс. лет на основе фундаментальных геодинамических закономерностей и локальных тенденций, установленных для участка (см. рис. 1). Мировая практика исследований в ПИЛ показывает [12–17], что центральное место отводится моделям, описывающим динамику изменения полей деформаций и напряжений, а также деструкцию породного массива [14]. Одним из надежных источников данных для задания граничных условий моделей являются геодезические наблюдения за СДЗК. В последние годы для этих целей активно используют ГНСС, позволяющие оценивать изменение координат пунктов с точностью до первых миллиметров [16, 18].

В 2010–2019 гг. в данном районе проводили ГНСС-наблюдения² [5, 18], по результатам которых впервые для зоны контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты были получены скорости горизонтальных СДЗК. Средние квадратические ошибки определения положения пунктов в плане и по высоте составили 3 и 5,5 мм соответственно. Сравнение скоростей деформаций Δ на участке Енисейский с приводимыми в литературе данными, полученными для активных зон ($\Delta = \pm 5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$ в год), показало, что они достаточно низкие [18].

Карта скоростей СДЗК была проанализирована в комплексе с данными высокоточного нивелирования и результатами сеймотектонических исследований [10]. На **рис. 3** показаны поле среднегодовых скоростей горизонтальных СДЗК и результат их кинематической интерпретации. Схема блоковых движений свидетельствует о современной тектонической активности Мура-товского, Атамановского, Канско-Атамановского, Правобережного и Шумихинского разломов. На западе района распределение

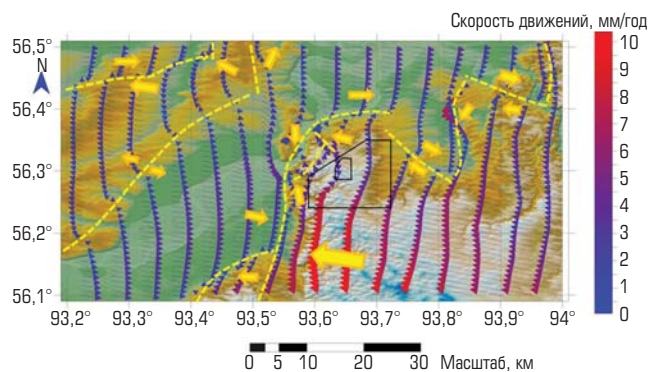


Рис. 3. Схема интерпретации блоковых движений в районе за 2012–2019 гг. по данным ГНСС-наблюдений. Пунктиром показаны границы блоков с разнонаправленными движениями

скоростей движений достаточно однородно. Там выделены три блока с максимальными скоростями ~2–3 мм/год. В зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты отмечены наибольшие значения скоростей горизонтальных движений на территории Атамановского отрога Енисейского кряжа (в зоне Атамановского разлома – сдвигового характера, в зоне Муратовского – надвигового). Полученная модель хорошо согласуется с результатами структурно-геологических и геодинамических исследований в районе [7–9, 11]. Скорость сближения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты в зоне взаимодействия южной части Енисейского кряжа можно оценить величиной 2–4 мм/год. Движения в восточной части района близки к субширотному направлению с азимутом ~100–110°.

Прогноз устойчивости основан на сопоставлении вычисленных значений напряжений по данным ГНСС-наблюдений с прочностными характеристиками породного массива; при этом использовали энергетическое предположение: разрушение СТБ происходит тогда, когда потенциальная энергия формоизменения (деформирования) достигает определенного предела. Степень опасности потери устойчивости, обусловленная концентрацией напряжений, оценивали в конечно-элементных моделях с помощью энергетических характеристик: *потенциальной энергии деформации, модуля ее градиента и потенциальной энергии формоизменения*. В разработанной методологии³ использовали следующие критерии оценки устойчивости [10].

1. *Концентрация потенциальной энергии формоизменения*, определяемая как отношение локального значения энергии формоизменения в СТБ к ее вычисленному среднему значению:

$$\infty(x, y) = \frac{U_{dev}}{\langle U_{dev} \rangle_{\Omega^{(k)}}},$$

где U_{dev} – девиаторная компонента энергии; $\langle U_{dev} \rangle_{\Omega^{(k)}}$ – среднее арифметическое этих компонент энергии по множеству блоков $\Omega^{(k)}$ ($k = 1, 2$).

² Обработку результатов ГНСС-наблюдений выполнял д-р техн. наук В. И. Кафтан.

³ Автор разработанных критериев и алгоритма д-р физ.-мат. наук И. Ю. Колесников.

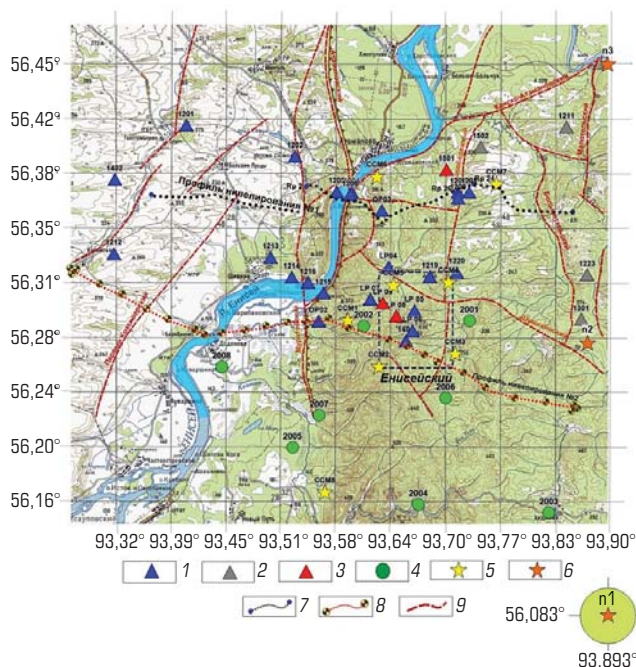


Рис. 4. Схема геодинамической сети:

1 – действующие ГНСС-пункты, обследованные в 2019 г.;
 2 – действующие ГНСС-пункты, состояние которых не известно; 3 – ГНСС-пункты, подлежащие восстановлению; 4 – планируемые для строительства ГНСС-пункты; 5 – станции сейсмического мониторинга; 6 – планируемые станции сейсмического мониторинга; 7 – профиль № 1 нивелирования 1-го класса точности; 8 – планируемый профиль № 2 повторного нивелирования 1-го класса точности; 9 – тектонические разломы

2. Концентрация потенциальной энергии деформации – отношение локального ее значения к среднему:

$$\beta(x, y) = \frac{U}{\langle U \rangle^{\Omega^{(k)}}}$$

где U – потенциальная энергия в центре СТБ; $\langle U \rangle^{\Omega^{(k)}}$ – среднее арифметическое значение энергии в центрах СТБ $\Omega^{(k)}$ ($k = 1, 2$).

3. Концентрация наибольшего убывания энергии, определяемая как отношение локальной величины модуля градиента к вычисленному ее среднему значению:

$$\gamma(x, y) = \frac{|\text{grad } U|}{\langle |\text{grad } U| \rangle^{\Omega^{(k)}}}$$

где $|\text{grad } U|$ – модуль градиента энергии; $\langle |\text{grad } U| \rangle^{\Omega^{(k)}}$ – среднее арифметическое этих значений в центрах блоков множества $\Omega^{(k)}$ ($k = 1, 2$).

4. Концентрация интенсивности энергии, учитывающая все составляющие концентрации энергии по вектору \vec{E} :

$$\delta(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}$$

На этапе создания ПИЛ возрастает роль системного обобщения результатов сеймотектонических и геодинамических исследований, а также необходимость их уточнения и детализации в более крупном масштабе на основе режимных геодезических наблюдений и сейсмического мониторинга в ближней зоне ПИЛ и на участке Енисейский. Это позволит уменьшить существующие неопределенности при подготовке материалов ОДБ и прохождении дальнейшей экспертизы проекта. Для этого в 2020 г. совместно с ИБРАЭ РАН была разработана «Программа долговременных наблюдений за дифференцированными движениями земной коры и сейсмической активностью на участке Енисейский и в окружающем его районе на период 2021–2026 гг.». Анализ опыта наблюдений, геометрии расположения пунктов и требований нормативных документов послужили основой для корректировки существующей геодинамической сети и разработки предложений по повышению эффективности исследований. На рис. 4 приведена структура дальнейшего развития сети геодинамических наблюдений в ближней и дальней зоне ПИЛ и на участке Енисейский.

Заключение

При обосновании долговременной безопасности захоронения высокоактивных РАО в породах Нижнеканского массива нельзя замыкаться на исследованиях только в подземных выработках ПИЛ. В этом случае мы ограничиваем себя в нахождении истинных причин, которые могут привести к разрушению структурного тектонического блока, вмещающего РАО, и системы инженерных барьеров. В силу своей энергетической мощи кинематика движений тектонических блоков является определяющей среди всех факторов природного характера. Разработанная комплексная методология изучения геодинамической устойчивости позволяет уменьшить неопределенности в прогнозе сохранности изоляционных свойств породных массивов.

Библиографический список

- Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements No. SSR-5. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. – 62 p.
- International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3.0. – OECD Nuclear Energy Agency, 2019. – 165 p.
- РБ-019-18. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях : утв. приказом Ростехнадзора от 11.05.2018 № 208. URL: <http://docs.cntd.ru/document/556827973> (дата обращения: 15.06.2020).
- Садовский М. А. О значении и смысле дискретности в геофизике // Дискретные свойства геофизической среды : сб. науч. тр. – М. : Наука, 1989.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Казан А. И. Кинематический метод геодинамического районирования при проектировании отработки месторождений подземным способом // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 7(163). С. 8–11.
- Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Юдинцев С. В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). – М. : ИГЕМ РАН, 2017. – 384 с.
- Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неужаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4(9). С. 46–62.
- Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г., Любцева Е. Ф., Шабалев С. И., Розозин Ю. М., Алексеев Н. Л. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов

- (Южно-Енисейский край) // Труды Радиового института им. В. Г. Хлопина. – СПб., 2006. Т. 11. С. 8–64.
9. Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Дзебоев Б. А., Белов И. О. Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474. № 1. С. 86–92.
 10. Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Татаринов В. Н. Моделирование уровней опасности напряженно-деформированного состояния в структурных блоках Нижнеканского гранитоидного массива (к выбору участков захоронения радиоактивных отходов) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2011. № 6. С. 524–542.
 11. Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р. Исследование систем действительных функций на двумерных сетках с использованием нечетких множеств // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20. № 1. С. 94–111.
 12. Martin C. D. R-07-26. Quantifying in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark. Forsmark stage 2.2. – Stockholm : Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2007. – 89 p.
 13. Chandler N. A., Rodney S. R., Martin C. D. In Situ Stress Measurement for Nuclear Fuel Waste Repository Design // Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium. – Montreal, 1996. P. 929–936.
 14. Батугина И. М., Батугин А. С. Опыт применения метода геодинамического районирования при решении геоэкологических задач // ГИАБ. 2014. Отдельный выпуск 1. Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка-2014». С. 228–233.
 15. Andersson J. Ch., Martin C. D. The Äspö pillar stability experiment: Part I – Experiment design // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2009. Vol. 46. Iss. 5. P. 865–878.
 16. Haapalehto S., Malm M., Kaisko O., Lahtinen S., Saaranen V. Results of monitoring at Olkiluoto in 2018, Rock mechanics : Workin Report 2019-47. – Posiva Oy, 2020. – 126 s.
 17. Jahr Th. Non-tidal tilt and strain signals recorded at the Geodynamic Observatory Moxa, Thuringia/Germany // Geodesy and Geodynamics. 2018. Vol. 9. Iss. 3. P. 229–236.
 18. Кафтан В. И., Гвишиани А. Д., Морозов В. Н., Татаринов В. Н. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижнеканском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 83–94. **ГЖ**

«GORNII ZHURNAL», 2021, № 3, pp. 108–112
DOI: 10.17580/gzh.2021.03.05

Geodynamic aspects of high-level radioactive waste disposal: A case-study of Nizhnekansky massif

Information about authors

V. N. Tatarinov¹, Head of Laboratory, Doctor of Engineering Sciences, v.tatarinov@gcras.ru
V. N. Morozov¹, Chief Researcher, Professor, Doctor of Engineering Sciences
E. N. Kamnev², Academic Secretary, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences
A. I. Manevich¹, Researcher

¹Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²VNIPIpromtekhologii, Moscow, Russia

Abstract

This article describes the methodological aspects and some results of the assessment and prediction of the geodynamic stability of the geological environment as applied to the problem of ensuring the safety of underground isolation of high-level radioactive waste (HLRW) in the geological formations of the Nizhnekansky massif, Krasnoyarsk Region. For this, the authors introduced a basic concept of the stability of the geological environment. Based on instrumental observations, mathematical models, system analysis of geospatial data, the ranking of structural tectonic blocks according to the degree of stability and the geodynamic zoning of the northern part of the Nizhnekansky massif were implemented. To assess the stability, the authors used geological data, a digital elevation model, the results of the interpretation of geophysical fields and geodetic observations.

It is shown that the stability of the blocks differs significantly according to kinematic parameters. Geodetic observations based on GPS/GLONASS satellite systems, carried out in 2010–2019, made it possible to obtain for the first time information on the rates of horizontal movements of the lithosphere and their cyclicity for the region located in the zone of force interaction of the largest tectonic structures, namely, Siberian platform, West Siberian plate and the Altai-Sayan Orogen. The maximum speeds were recorded for points located in the zone of dynamic influence of the Muratovsky and Pravoberezhny faults. The energy concentration criteria as the fracturability characteristics of structural rock blocks are proposed for the stress–strain analysis of rock mass.

To substantiate the long-term geodynamic safety of deep disposals of HLRW of the 1st and 2nd classes, the authors developed a program for the long-term observations of differentiated movements in the earth's crust and seismic activity for 2021–2026 in an underground research laboratory.

The study was carried out under the state contract between the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Keywords: geodynamics, stability of the geological environment, modern movements of the earth's crust, stress–strain state, global navigation satellite systems, radioactive waste, Nizhnekansky massif.

References

1. Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements No. SSR-5. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. 62 p.
2. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3.0. OECD Nuclear Energy Agency, 2019. 165 p.
3. Safety Guidance RB-019-18. Safety Guidance on Nuclear Energy Utilization. Estimation of initial regional seismicity and the nuclear energy use site during engineering survey and study. Approved by the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia, Order No. 208, dated may 11, 2018. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/556827973> (accessed: 15.06.2020).
4. Sadovskiy M. A. Role and implication of discretization in geophysics. *Discrete Properties of Geophysical Environment : Collection of Scientific Papers*. Moscow : Nauka, 1989.
5. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kolesnikov I. Yu., Kagan A. I. Kinematic method of geodynamic zoning in the design of deep underground deposits. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*. 2014. No. 7(163). pp. 8–11.
6. Kochkin B. T., Malkovskiy V. I., Yuditsev S. V. Scientific framework for safety evaluation of geological isolation of long-lived radioactive waste : A case-study of the Yenisei Project. Moscow : IGEM RAN, 2017. 384 p.
7. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Assessing the state of the geological environment at the Yeniseyskiy site (Krasnoyarsk region). *Radioaktivnye atkhody*. 2019. No. 4(9). pp. 46–62.
8. Anderson E. B., Savonenkov V. G., Lyubtseva E. F., Shabalev S. I., Rogozin Yu. M., Alekseev N. L. Results of prospecting and scientific-research works for the choice of sites for underground isolation of high-level radioactive wastes and irradiated fuel at Nizhnekamsk granitoid massif (South-Yenisei log). *Proceedings of radium institute named after V. G. Khlopin*. Saint-Petersburg, 2006. Vol. 11. pp. 8–64.
9. Gvishiani A. D., Agayan S. M., Dzeboev B. A., Belov I. O. Recognition of strong earthquake-prone areas with a single learning class. *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 474. No. 1. pp. 546–551.
10. Morozov V. N., Kolesnikov I. Yu., Tatarinov V. N. Modeling the Hazard Levels of Stress-Strain State in Structural Blocks in Nizhnekanskii Granitoid Massif for Selecting Nuclear Waste Disposal Sites. *Water Resources*. 2012. Vol. 39, No. 7. pp. 756–769.
11. Gvishiani A. D., Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R. Investigation of systems of real functions on two-dimensional grids using fuzzy sets. *Chebyshevskiy sbornik*. 2019. Vol. 20, No. 1. pp. 94–111.
12. Martin C. D. R-07-26. Quantifying in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark. Forsmark stage 2.2. Stockholm : Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2007. 89 p.
13. Chandler N. A., Rodney S. R., Martin C. D. In Situ Stress Measurement for Nuclear Fuel Waste Repository Design. *Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium*. Montreal, 1996. pp. 929–936.
14. Batugina I. M., Batugin A. S. Experience in the use of geodynamic zoning for geo-environmental problem. *GIAB*. 2014. Proceedings of international scientific symposium “Miner’s Week-2014”. pp. 228–233.
15. Andersson J. Ch., Martin C. D. The Äspö pillar stability experiment: Part I – Experiment design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2009. Vol. 46, Iss. 5. pp. 865–878.
16. Haapalehto S., Malm M., Kaisko O., Lahtinen S., Saaranen V. Results of monitoring at Olkiluoto in 2018, Rock mechanics : Workin Report 2019-47. Posiva Oy, 2020. 126 s.
17. Jahr Th. Non-tidal tilt and strain signals recorded at the Geodynamic Observatory Moxa, Thuringia/Germany. *Geodesy and Geodynamics*. 2018. Vol. 9, Iss. 3. pp. 229–236.
18. Kaftan V. I., Gvishiani A. D., Morozov V. N., Tatarinov V. N. Methods and results of determination of movements and deformations of the Earth’s crust according to GNSS data at the Nizhne-Kansk geodynamic test network in the area of radioactive waste disposal. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. Vol. 16, No. 1. pp. 83–94.