

ПОДЗЕМНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ: ЗАДАЧИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В. Н. Татаринов^{1,2}, В. Н. Морозов¹, В. И. Кафтан¹, А. И. Маневич¹, Т. А. Татаринова^{1,2}

¹Геофизический центр РАН, Москва

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2019 г.

В статье рассматриваются геодинамические аспекты исследований в связи с началом строительства подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) на участке «Енисейский» Нижнеканского массива. В рамках современных представлений о геодинамических процессах в верхней части земной коры сформулирована цель инструментальных наблюдений за ее движениями с использованием методов космической геодезии и высокоточного нивелирования на период 2019–2024 гг. Предложен план первоочередных исследований, ориентированных на прогноз стабильности изоляционных свойств пород структурно-тектонического блока, вмещающего ПИЛ.

Ключевые слова: высокоактивные радиоактивные отходы, подземная исследовательская лаборатория, геодинамика, современные движения земной коры, глобальные навигационные спутниковые системы, тектонические разломы.

Введение

Фундаментальным условием безопасности подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) является обеспечение сохранности изоляционных свойств геологической среды на весь период их радиобиологической опасности. Этот период превышает 10–100 тыс. лет. Тектонический режим в районе должен быть устойчивым и стабильным, т. е. деформации земной коры (быстрые — за счет сейсмической активности, или медленный крип) не должны привести к ее разрушению и массовому распространению радионуклидов. Прогноз геодинамической устойчивости территорий построен на анализе движений земной коры геологическими методами, которые охватывают большие временные интервалы. Мониторинг современных движений земной коры (СДЗК) на геодинамических полигонах (ГДП) по своей сути является прямым и эффективным методом определения тектонической активности региона.

В районе строительства первого в России пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (ПГЗРО) в 2010 году был создан ГДП для обоснования безопасности изотопно-химического завода ФГУП «ГХК». В течение 2010–2016 гг. были проведены наблюдения за горизонтальными и вертикальными компонентами СДЗК и скоростями деформаций земной поверхности.

В процессе исследований впервые были получены знания о геодинамическом режиме района, который находится в зоне контакта крупнейших тектонических структур: Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Саянского орогена, на основе наблюдений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [24–26]. Был установлен циклический характер СДЗК на границе этих геологических структур. В 2013–2014 гг. была зафиксирована активизация геодинамического режима, проявившаяся в резкой смене знака деформаций

сжатия и растяжения на западном и восточном берегах р. Енисей.

Максимальные скорости СДЗК были зафиксированы в зоне динамического влияния Муратовского и Правобережного разломов. По геоморфологическим данным эти участки представлены наиболее выраженным в районе градиентом рельефа [1], что подтверждает унаследованный характер современных движений, по крайней мере, начиная с четвертичного периода. В этой связи возникает объективная необходимость продолжения наблюдений в районе участка «Енисейский» для получения данных об устойчивости геодинамического режима территории, которые обязательны при проведении международной экспертизы пригодности участка для подземной изоляции РАО.

Цель статьи — определить первоочередные задачи геодинамических исследований в ПИЛ на 2019—2024 гг. в области геодинамики и способы их решений в соответствии с положениями, изложенными в «Стратегии создания пункта...» [22], «Стратегическом мастер-плане...» [4] и «Программе ...» [18], а также в решениях НТС № 10 «Экология и радиационная безопасность» ГК «Росатом» от 10.10.2018.

Необходимо подчеркнуть, что рассматриваемые задачи, безусловно, должны и будут корректироваться с учетом мнений специалистов и получения новых знаний о районе. Рассмотрим существующие нормативные требования, регулирующие геодинамические исследования на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ).

Необходимость геодинамических исследований в ПИЛ

Необходимость геодинамического мониторинга на ОИАЭ определяется рядом существующих норм и правил [14—17]. В соответствии с ними, в т. ч. законом № 190-ФЗ (статья 26, п. 1), обязательным этапом являются работы, направленные на прогноз *геодинамических и тектонических процессов*, т. к. должна быть гарантирована устойчивость геологической среды при внешних природных воздействиях, к которым относятся современные медленные (экзогенные и эндогенные) *дифференцированные геодинамические движения*.

Изучение дифференцированных движений проводят путем измерения смещений пунктов ГДП и расчета деформаций непосредственно у границ структурных тектонических блоков, где они имеют большую свободу перемещений и являются индикаторами происходящих в земных недрах тектонических процессов. При этом напряженно-деформированное состояние (НДС) внутри структурного блока, вмещающего объект окончательной изоляции РАО, интегрально отражает кинематическое воздействие соседних

блоков, в т. ч. расположенных на достаточно большом удалении от ПИЛ.

В федеральных нормах и правилах устанавливаются:

- номенклатура процессов, явлений и факторов природного происхождения, классификация их по степеням опасности;
- требования к инженерным изысканиям и исследованиям процессов, явлений и факторов природного происхождения;
- классы площадок размещения ОИАЭ по степени опасности процессов, явлений и факторов природного происхождения;
- требования к мониторингу процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения.

В них определены геологические и инженерно-геологические процессы и явления, которые должны изучаться в районе и на площадке размещения ОИАЭ: сейсмостектонические разрывные смещения, сейсмодислокации, сейсмостектонические поднятия, *современные дифференцированные движения земной коры, тектонический крип*, остаточные сейсмодетонации, проявления карста, мерзлотно-геологические процессы и др.

Для выявления и идентификации процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения регламентированы изыскания, в т. ч. *геодезические наблюдения за современной геодинамикой разрывных нарушений*, включая высокоточное повторное нивелирование и методы космической геодезии.

Если на площадке размещения ОИАЭ возможны процессы и явления природного происхождения I и II степеней опасности, включая опасные СДЗК, то системы мониторинга для оценки их параметров должны быть созданы и функционировать еще до ввода в эксплуатацию ОИАЭ.

Устанавливаются три степени опасности процессов, явлений и факторов природного происхождения по последствиям воздействия:

I степень — особо опасный процесс (явление, фактор), характеризующийся максимально возможными для данного вида процесса значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени и сопровождающийся природными и/или техногенными катастрофами;

II степень — опасный процесс (явление, фактор), характеризующийся достаточно высокими (но не выше, чем известное максимальное значение для данного вида процесса) значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени и сопровождающийся ощутимыми последствиями для окружающей среды;

III степень — не представляющий опасности процесс (явление, фактор), характеризующийся низкими значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени и не сопровождающийся ощутимыми последствиями.

Определены следующие предельные параметры — *современные дифференцированные движения земной коры*:

1 степень опасности — подвижка по разрыву более или равна 0,3 м, наличие геодинамических зон с градиентом скорости четвертичных движений 10^{-6} в год и более;

2 степень опасности — подвижка по разрыву менее 0,3 м, наличие геодинамических зон с градиентом скорости четвертичных движений от 10^{-9} до 10^{-6} в год.

Необходимо подчеркнуть, что в документах недостаточно четко определены количественные критерии районирования территории по степени опасности для скоростей горизонтальных движений. По этой тематике имеются лишь отдельные публикации. Например, в работе Ю. О. Кузьмина [10] приводятся критерии среднегодовых скоростей деформаций для участков с повышенной геодинамической опасностью. Величина горизонтальной скорости деформаций составляет $\Delta \geq \pm(5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5})$.

Основными параметрами, описывающими современные дифференцированные движения земной коры и тектонический крип, являются:

- расположение тектонически активных разломов, региональных и других разрывов;
- длина и ширина зон этих разломов и разрывов;
- структура тектонически активных разломов;
- скорость поднятия и опускания тектонических блоков;
- скорость тектонического крипа в разном режиме движения (стабильном, циклическом, а также до и после удаленных землетрясений);
- смещение (поднятие и опускание, сдвиг, наклон) тектонических блоков;
- градиент движений — отношение амплитуды смещения к ширине зоны деформирования и единице времени;
- возраст и амплитуда смещения при наиболее молодом тектоническом крипе и характер их проявления в рельефе.

В документе [13] дается определение *активного разлома*, под которым понимается тектонический разлом, в зоне которого за четвертичный период геологического развития произошло относительное перемещение примыкающих блоков земной коры на 0,5 м и более, или наблюдаются их относительные смещения со скоростями современных движений 5 мм/год и более. А также вводятся понятие *геодинамической зоны* (тектонические структуры, активные в четвертичном периоде геологического развития) и *градиента тектонических движений* (изменение амплитуды тектонического перемещения маркирующей поверхности на единице расстояния и времени).

Необходимо различать понятия «активный разлом» и «опасный разлом». Активный разлом характеризуется наличием аномальных, по сравнению с фоновыми, движений. Они могут и не являться опасными для ПГЗРО. «Современный

активный разлом» является зоной накопления опасных деформаций.

Если же учесть, что деформации носят пульсационный характер (что доказано для многих регионов земного шара и для данного района в [26]), то необходимо использовать представления не о монотонном накоплении деформаций, а о периодическом характере. В этом случае вводится коэффициент C , который учитывает цикличность деформаций. Тогда критерий выделения опасного разлома будет иметь следующий вид:

$$\theta < \frac{C \varepsilon_i}{t}, \quad (1)$$

где ε_i — рассчитанные деформации; C — эмпирический коэффициент, который по результатам длительных, повторных геодинамических наблюдений колеблется в диапазоне 3–5; t — время.

В документе [14] приведены критерии для оценки скоростей деформаций по наблюдениям за СДЗК на основе GPS/ГЛОНАСС систем. В частности, в Приложении 1 данного документа приведена номограмма для оценки скоростей опасных горизонтальных деформаций в зависимости от длины профиля наблюдений (рис. 1, табл. 1).

Таким образом, в нормативных документах выделяется необходимость:

а) инструментального определения параметров СДЗК (скоростей вертикальных и горизонтальных

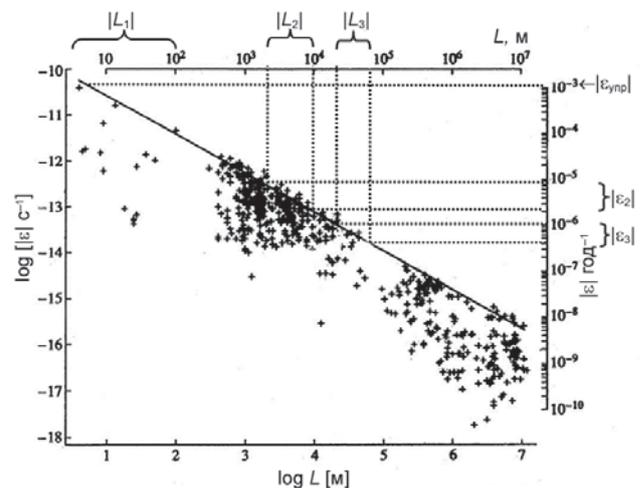


Рис. 1. Распределение модулей скоростей горизонтальных деформаций в зависимости от длины профиля наблюдений с учетом [3]

Таблица 1. Критерии оценки опасности измеренных деформаций земной коры

	Размеры области мониторинга, м	Максимальная скорость деформаций, год ⁻¹
Район	$L_3 = 3 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^4$	$ \varepsilon_3 = 2 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-7}$
Площадка	$L_2 = 3 \cdot 10^3 - 10^4$	$ \varepsilon_2 = 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$
Приконтурная часть массива ПГЗРО	$L_1 = 1 - 10^2$	$ \varepsilon_1 = 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-5}$

смещений земной поверхности и их градиентов) в ближней зоне (с радиусом до 30 км) и непосредственно на площадке ОИАЭ;

б) создания постоянно действующих ГДП для мониторинга параметров СДЗК на всех стадиях существования ОИАЭ;

в) выявления негативных факторов, способных повлиять на безопасность и устойчивость ОИАЭ, на основе инструментальных геодезических методов изучения дифференцированных движений и деформаций верхней части земной коры;

г) учета масштабного пространственно-временного фактора при интерпретации данных наблюдений.

Наблюдения за современными дифференцированными движениями земной коры

Цель наблюдений за СДЗК заключается в получении количественных параметров современных вертикальных и горизонтальных движений земной коры, обусловленных тектоническими процессами, в радиусе до 15 км от ПГЗРО (дальняя зона), необходимых для:

а) выявления активных тектонических структур и геодинамических зон;

б) определения величин и направленности современных движений крупных тектонических нарушений и на границах структурных блоков;

в) прогноза скоростей деформаций на участке «Енисейский»;

г) задания кинематических граничных условий для численного моделирования напряженно-деформированного состояния в ближней зоне подземных выработок ПГЗРО.

Для достижения этой цели достаточно двух видов инструментальных наблюдений:

1. Мониторинг горизонтальных компонент СДЗК на основе ГНСС;

2. Мониторинг вертикальных компонент методом высокоточного повторного нивелирования 1-го класса точности.

Необходимость использования одновременно двух методов обусловлена тем, что каждый из них обладает приблизительно на порядок большей точностью измерений горизонтальных (ГНСС) и вертикальных (метод нивелирования) смещений земной поверхности.

В районе участка «Енисейский» имеется геодинамический полигон, созданный совместно со специалистами ФГУП «ГХК» в 2012–2016 гг. для наблюдений за СДЗК на основе ГНСС, включающий в себя 30 капитальных ГНСС-пунктов (рис. 2). За период с 2010 по 2016 гг. на геодинамическом полигоне было выполнено 5 эпох ГНСС-наблюдений [24, 26]. За весь период наблюдений лишь в редких случаях горизонтальные скорости СДЗК превышали 5 мм/год. Сравнение скоростей деформаций и

существующих критериев выделения опасных геодинамических зон [11] показало, что район в геодинамическом плане достаточно стабилен, т. к. максимальные скорости деформаций составили $5 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹.

Анализ результатов ГНСС-наблюдений, приведенных в [12] и др. публикациях, позволяет утверждать, что:

а) для окончательного вывода необходимо продолжение исследований для получения более длительного временного ряда данных о СДЗК;

б) при выделении зон опасных деформаций имеются расхождения по различным методикам расчета, что, очевидно, вызвано пространственно-временным масштабным эффектом, учет которого в дальнейшем необходим.

Очевидно, что мониторинг СДЗК необходимо возобновить до начала ведения горных работ. Во-первых, это позволит исключить пробелы во временном ряде данных о СДЗК и в пропуске аномальных значений. Во-вторых, необходимо зафиксировать «нулевое» положение пунктов ГДП, за изменением которых и будет вестись впоследствии мониторинг.

В 2019–2025 гг. предполагается выполнение следующих работ (рис. 2):

- 1) рекогносцировка пунктов существующей сети (2019 г.);
- 2) составление проекта дооборудования ГДП (2019 г.);
- 3) установка дополнительных пунктов в южной части района (2019 г.);
- 4) проведение ежегодных (при достаточном финансировании два раза в год) циклов ГНСС-наблюдений (2019–2025 гг.);
- 5) обработка данных, составление карт скоростей деформаций, комплексная интерпретация результатов (2025 г.).

Необходимо отметить, что после установки новых ГНСС-пунктов, согласно инструкции, должен быть некоторый временной период их «отстойки», поэтому, учитывая реальное положение дел по заключению контрактов, выполнение первого цикла наблюдений может быть перенесено на 2020 год.

По результатам ГНСС-мониторинга с учетом комплексной интерпретации геодезических и геофизических данных будут:

- установлены скорости горизонтальных и вертикальных СДЗК;
- рассчитана дилатация земной поверхности на участке «Енисейский»;
- установлены кинематические и динамические характеристики основных разломов;
- выполнена оценка влияния СДЗК на напряженно-деформированное состояние в ближней зоне ПГЗРО;
- уточнена конфигурация блокового строения района размещения ПГЗРО.



Рис. 2. Схема геодинимических наблюдений в 2019–2024 гг. Желтые треугольники – существующие ГНСС-пункты, красные кружки – новые ГНСС-пункты, черный пунктир – существующий профиль повторного нивелирования № 1, красный пунктир – новый профиль повторного нивелирования № 2

Наблюдения за вертикальными движениями земной поверхности методом высокоточного повторного нивелирования

Нивелирование хода, пересекающего основные тектонические нарушения в районе ПГЗРО, проводилось в 2011–2015 гг. по программе нивелирования I класса силами специалистов ООО «Геолком» и ФГУП «ГХК». Ранее измерения в районе носили нерегулярный характер, поэтому по их результатам оценить динамику современных вертикальных СДЗК было практически невозможно [12].

Методика нивелирования I класса характеризуется параметрами, приведенными в табл. 2 [19–22 и др.]. Существующий в настоящее время профиль нивелирования [12] представляет собой линию, проходящую с востока на запад от восточного крыла Минжуй-Сидельниковского сброса на восток – до восточного крыла Большетельского сброса (рис. 2). Для охвата наблюдениями

участка Енисейский предлагается проложить нивелирный ход № 2 южнее профиля № 1.

Общая фактическая протяженность нивелирных ходов составляет около 45 км, а ориентировочное количество пунктов – 70. Расстояние между пунктами определяется наличием существующих разломов и блоковой структурой района, но не должно превышать 2 км.

Конструкция пунктов геодезической сети представляет собой [19] стальной трубчатый знак диаметром 150–180 мм, заглубленный на 3 м и выступающий над поверхностью земли на 1,2 м с обсадной трубой диаметром 400–500 мм, заполненной утеплителем (стекловата, керамзит), поверх которого заливается 10-сантиметровый слой гидроизоляции (битум, гудрон). К верхнему концу трубы приваривается центрировочное устройство, к нижнему концу – якорь (уголок, труба, арматурная проволока).

Места размещения пунктов наблюдательной сети должны обеспечивать оптимальные

Таблица 2. Параметры нивелирования I класса [19]

Параметр	Характеристика
Нивелир	TrimbleDINI 12 (СКО нивелирования $\pm 0,3$ мм на 1 км двойного хода)
Нивелирные рейки	3-метровые, инварные, кодовые
Минимальная длина визирного луча	15 метров
Максимальная длина визирного луча	50 метров
Неравенство длин визирных лучей на станции	не более 0,3 метра
Измерение длин визирных лучей на станции	стальная рулетка, трос
Накопление неравенств длин визирных лучей в секции	не более 1,0 метра
Высота визирного луча над подстилающей поверхностью	не менее 0,8 метра
Число горизонтов	1
Число линий нивелирования	2 (левая и правая)
Число направлений	2 (прямо и обратно)
Учет метеоусловий	измерение температуры воздуха на высоте нивелира один раз в час
Расхождение первого и второго отсчета по рейке (мм)	0,3
Расхождение в значении превышения по левой и правой линии (мм)	$2\sqrt{L}$ (км)
Расхождение в значении превышения в секции прямо и обратно (мм)	$1\sqrt{L}$ (км)
Невязка в замкнутых полигонах (мм)	$1\sqrt{L}$ (км)

условия для наблюдений, сохранность, возможность круглосуточного доступа к пунктам и проведение работ в любое время года. На рис. 2 показана схема расположения профилей высокоточного нивелирования I класса с учетом дополнительных пунктов наблюдений. Положение нового профиля № 2 показано по данным проекта ГСПИ 2017 г. [19]. Периодичность наблюдений — 1 раз в год.

В 2019—2025 гг. предполагается выполнение следующих работ:

- 1) полевая рекогносцировка существующей сети (2019 г.);
- 2) составление проекта дооборудования профилей нивелирования (2019 г.);
- 3) установка дополнительных пунктов по профилю № 2 (2019 г.);
- 4) проведение ежегодных наблюдений по двум профилям (2019—2024 гг.);
- 5) обработка данных, построение схем и разрезов вертикальных смещений по профилю, комплексная интерпретация результатов совместно с данными ГНСС-наблюдений (2025 г.).

Правильность выводов о характере геодинамической активности района определяется качеством проведения полевых измерений СДЗК и обработки данных, а также зависит от квалифицированной геолого-геодинамической интерпретации полученных результатов. В этой

связи, рассмотрим точность измерения параметров СДЗК методами ГНСС.

Пути повышения точности измерений параметров СДЗК в окрестностях ПИЛ

Надежность определения скоростей горизонтальных СДЗК можно повысить тремя путями: использованием современной аппаратуры, применением специальных методических приемов при проведении полевых наблюдений и обработкой данных.

Для обеспечения высокой точности геодинамического мониторинга в наблюдениях используются двухчастотные и преимущественно двухсистемные ГНСС-приемники геодезического класса, регистрирующие сигналы одновременно двух навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Сегодня такая конфигурация ГНСС-аппаратуры обеспечивает получение точности определения горизонтальных и вертикальных смещений на уровне первых миллиметров [7, 8].

В методическом отношении для улучшения качества используются «классические» способы: принудительное центрирование, единая образная схема установки антенн и приемников для различных эпох наблюдений, увеличение продолжительности сеансов наблюдений и др. Каждый цикл наблюдений содержит в себе несколько расстановок ГНСС-приемников, образующих фрагменты единой сети, имеющие взаимные перекрытия. Это обусловлено количеством комплектов ГНСС-аппаратуры, участвующих в наблюдениях и одновременно способствует достижению высокой точности измерений.

В 2012—2016 гг. для наблюдений использовалось 12 комплектов двухчастотных ГНСС-приемников «Hiper» (7 шт.) с антеннами MarAnt+ и «TopconGR-3» (5 шт.). В последнее время в ГЦ РАН в рамках выполнения проекта РНФ № 18-17-00241 (руководитель акад. А. Д. Гвишиани) производится модернизация аппаратурного и программного обеспечения мониторинга СДЗК, приобретены 3 приемника «Дельта-3N» JAVAD GNSS. Конфигурация новых GPS/ГНСС приемников позволит получить максимально возможную на данный момент точность регистрации горизонтальных смещений на уровне первых миллиметров [9].

Определение деформаций земной поверхности осуществляется путем математической обработки временных разностей измерений текущего и начального циклов. При обработке повторных ГНСС-измерений на ГДП используется методика разностного уравнивания кинематической спутниковой геодезической сети [22]. Известно, что раздельное уравнивание циклов измерений в кинематических геодезических сетях менее эффективно, чем уравнивание разностей повторных наблюдений с целью определения векторов пространственных смещений геодезических пунктов. Это обусловлено значительным

однообразие физических условий измерений в каждом из циклов, которое при обработке разностей наблюдений обеспечивает получение более эффективных оценок. Однообразие условий наблюдений в каждом цикле связано с местными особенностями, такими как постоянные препятствия прохождению радиосигнала, объекты, вызывающие его переотражения, конструктивные особенности геодезических центров, сезонные состояния атмосферы и др. Эти факторы порождают односторонне действующие ошибки в измерениях, которые существенно ослабляются в их временных разностях.

Следует отметить, что запись радиосигнала осуществляется одновременно по двум спутниковым системам ГЛОНАСС и GPS. Было установлено, что точность наблюдений при доведении группировки ГЛОНАСС до сегодняшнего состава GPS может повыситься приблизительно до полутора раз [7, 9].

Заметим, что деформации земной поверхности в пределах конечного элемента (треугольника) ГДП, вершинами которого являются ГНСС-пункты, обратно пропорциональны его площади. Это осложняет интерпретацию пространственного распределения деформаций в неоднородной сети. При равных смещениях пунктов в неравновеликих треугольниках деформации будут не равны, что может интерпретироваться как аномалии геодезического режима. Для устранения этого недостатка нами применяется масштабирование деформаций — приведение их к средней или заданной стандартной площади треугольника. Для этого значения первичных деформаций умножаются на масштабные коэффициенты $m = P_i/P_m$, где P_i — площадь i -го треугольника, P_m — средняя (стандартная) площадь треугольника.

Реальная точность ГНСС-измерений обусловлена многими природными и аппаратурными факторами, в т. ч. не поддающимися строгой коррекции. Вопрос точности определения координат и длин базисных линий между пунктами наблюдений является определяющим в геодезических исследованиях, когда скорости СДЗК лишь незначительно превышают разрешающую способность аппаратуры. В этой связи был проведен эксперимент по тестированию ГНСС-приемников на эталоне. ГНСС-приемники, имеющиеся на балансе ГЦ РАН, прошли тестирование на эталонном геодезическом базисе Федерального центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных Росреестра [2, 10]. Длины линий этого базисного эталона измеряются регулярно высокоточными электронными измерительными средствами: лазерными дальномерами и тахеометрами. Точность определения расстояний базиса оценивается средней квадратической ошибкой 0,3 мм.

Схема расположения эталонного базиса, расположенного в северной части Московской



Рис. 3. Эталонный базис Федерального центра геодезии, картографии (Московская область). Красные линии — линии базиса. Желтые маркеры — пункты установки аппаратуры



Рис. 4. Центр эталонных базисов при эксперименте

области, представлена на рис. 3, а внешний вид центров — на рис. 4.

Центры пункта представляют собой бетонные монолиты, заглубленные в грунт на расстояния, превышающие глубину его промерзания. В верхней части бетонных монолитов вмонтированы центрировочные устройства, обеспечивающие центрирование с ошибкой 0,1–0,2 мм (рис. 4).

Принцип тестирования ГНСС-аппаратуры заключался в ее установке на центрах базиса и измерении векторов базовых линий между этими центрами, которые сравнивались с эталонными значениями. Измерения выполнялись статическими сеансами по 4 часа на разных отрезках базиса. Одновременно велась запись GPS и ГЛОНАСС спутников. В результате были вычислены длины базовых линий и их горизонтальные положения. Сравнение измерений с эталонами представлено в табл. 3.

Результаты сравнения показали высокую точность измерений. Средняя квадратическая ошибка (СКО) составила 2,4 мм (табл. 3) при заявленной фирмой — производителем ГНСС-аппаратуры 3,0 мм для коротких базовых линий длиной менее километра. Средняя разность 0,8 мм не выходит за пределы 30% величины средней квадратической ошибки, что свидетельствует об отсутствии статистически значимой систематической ошибки в измерениях.

Полученные ранее СКО в районе Нижнеканского массива в плане и по высоте составили,

Таблица 3. Сравнение измеренных горизонтальных проложений с эталонными значениями

Номера центров базиса	Измеренные расстояния, м	Превышения, м	Эталонные горизонтальные проложения, м	Поправки в наклонное расстояние, мм	Измеренные горизонтальные проложения, м	Расхождения, мм
1–3	599,796	-2,97	599,7913	-7,3	599,7887	-2,6
3–5	887,221	-1,43	887,2227	-1,2	887,2198	2,9
1–5	1487,018	-4,48	1487,014	-6,8	1487,0112	2,8
2–4	575,329	-2,83	575,3320	-7,0	575,3220	0
Среднее						0,8
СКО						2,4

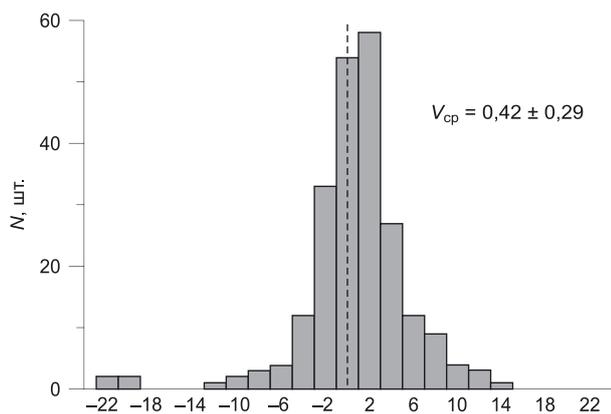


Рис. 5. Гистограмма распределения изменения длин базисных линий на ГДП Нижнеканского массива за период с 2010 по 2016 г.

соответственно, 3–4 мм и 6–7 мм для 6 эпох наблюдений [24]. Поэтому можно утверждать, что для полученных величин изменения длин базисных линий ΔL в районе Нижнеканского массива (рис. 5) [26], величина СКО позволяет выявить аномальные значения горизонтальных СДЗК и незначительно превышает уровень 2,4 мм, который был получен для эталона и измерений в «идеальных» условиях.

Деформационный анализ результатов ГНСС-наблюдений

Важнейший элемент геодинамического мониторинга — геолого-геодинамическая интерпретация результатов ГНСС-наблюдений, основанная на методе дифференциального описания деформаций в механике сплошных сред, именуемого

методом конечных элементов [5]. Методы определения деформаций в пределах конечных элементов пространственных геодезических сетей разработаны и описаны в [6]. На сегодняшний день наиболее эффективным представляется отдельный анализ плановых и вертикальных деформаций по результатам повторных спутниковых наблюдений. Для этой цели используется следующая методика [25].

Полученные из уравнивания разностей измерений векторы пространственных смещений пунктов контрольных сетей преобразуются в разности геодезических координат ΔB , ΔL и ΔH . Для этой цели используем следующие дифференциальные формулы

$$\begin{cases} \Delta B = \frac{1}{M+H}(-\Delta X \sin B \cos L - \Delta Y \sin B \sin L + \Delta Z \cos B) \\ \Delta L = \frac{1}{(N+H)\cos B}(-\Delta X \sin L + \Delta Y \cos L) \\ \Delta H = \Delta X \cos B \cos L + \Delta Y \cos B \sin L + \Delta Z \sin B \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{где } M = \frac{a(1-e^2)}{W^3}, \quad N = \frac{a}{W}, \quad W = \sqrt{1-e^2 \sin^2 B},$$

где: a — большая полуось и e^2 — квадрат эксцентриситета общеземного эллипсоида.

Для каждого треугольника в плоской прямоугольной системе координат имеем значения координат его вершин x , y и разностей координат (горизонтальных смещений) Δx , Δy , полученных из уравнивания повторных спутниковых измерений. Тогда плановые деформации γ_1 , γ_2 , Δ и ω получаем по формулам [5]:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{x_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) + y_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) - x_3(\Delta y_2 - \Delta y_1) - y_3(\Delta x_2 - \Delta x_1)}{x_2 y_3 - x_3 y_2} \\ \gamma_2 &= \frac{x_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) + y_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) - x_3(\Delta x_2 - \Delta x_1) - y_3(\Delta y_2 - \Delta y_1)}{x_2 y_3 - x_3 y_2} \\ \Delta &= \frac{x_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) - y_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) - x_3(\Delta y_2 - \Delta y_1) + y_3(\Delta x_2 - \Delta x_1)}{x_2 y_3 - x_3 y_2} \\ \omega &= \frac{-x_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) - y_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) + x_3(\Delta x_2 - \Delta x_1) + y_3(\Delta y_2 - \Delta y_1)}{2(x_2 y_3 - x_3 y_2)} \end{aligned} \quad (3)$$

Деформации максимального и минимального растяжения будут равны

$$E_1 = \frac{1}{2} \left(\Delta + \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \right), \quad E_2 = \frac{1}{2} \left(\Delta - \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \right), \quad (4)$$

а азимут главной оси деформаций определяется выражением

$$\operatorname{tg} 2\theta_0 = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}. \quad (5)$$

$$f_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)} = \frac{1}{x_2 y_3 - x_3 y_2} \begin{pmatrix} -y_2 + y_3 & x_2 - x_3 & -y_3 & -x_3 & y_2 & x_2 \\ -x_2 + x_3 & y_2 - y_3 & -x_3 & -y_3 & x_2 & -y_2 \\ y_2 - y_3 & -x_2 + x_3 & y_3 & -x_3 & -y_2 & x_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & x_3 & y_3 & -x_2 & -y_3 \end{pmatrix}.$$

Здесь индексы при коэффициентах являются номерами вершин треугольника, к которому относятся соответствующие компоненты деформаций.

Далее определяем средние квадратические ошибки компонент деформаций по формуле:

$$m_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)} = \mu \sqrt{\operatorname{diag} Q_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)}}. \quad (7)$$

Аналогичным образом производится оценка точности деформаций максимального и минимального растяжения и азимута их осей, как функций от четырех главных деформационных характеристик.

Заключение

При изучении геоэкологической безопасности подземной изоляции РАО в ПИЛ на участке «Енисейский» нельзя замыкаться на изучении состояния породного массива только в подземных выработках. В этом случае мы существенно ограничиваем себя в нахождении истинных причин, которые могут привести к возможному разрушению структурного блока, вмещающего ПГЗРО и системы инженерных барьеров. В силу своей энергетической мощи кинематика структурно-тектонических блоков на участке «Енисейский» и прилегающих районах является определяющей среди всех прочих факторов природного характера.

Рассматривая результаты ГНСС-наблюдений в районах, в тектоническом плане близких к Нижнеканскому массиву, можно утверждать, что для принятия надежных выводов о стабильности или аномальности территории период инструментальных наблюдений должен быть не менее 10 лет. Предварительные результаты обработки данных наблюдений за СДЗК за 2012–2016 гг. показали, что необходимо также учитывать циклический эффект движений на границе Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты, заключающийся в чередовании относительно

Оценку точности компонент деформаций в пределах каждого треугольника выполняем путем получения их ковариационной матрицы:

$$Q_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)} = f_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)} Q_{dx} f_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)}^T, \quad (6)$$

где Q_{dx} – ковариационная матрица компонент векторов смещений, полученных из уравнивания разностей спутниковых измерений. Матрица частных производных искомых компонент деформаций по аргументам плановых смещений (6) будет иметь вид:

длительных периодов слабых тектонических движений с кратковременными периодами резкой активизации.

Используемая методика полевых наблюдений, прошедшая апробацию на ГДП, позволяет выявить аномальные значения горизонтальных СДЗК и дилатации земной поверхности. Полученные значения средних квадратических ошибок на ГДП в районе Нижнеканского массива показали, что они незначительно превышают уровень в 2,4 мм, который был получен при измерениях на эталонном объекте.

Необходимо продолжение начатых в 2012 г. наблюдений за вертикальной и горизонтальными компонентами СДЗК для устойчивого выявления аномальных параметров СДЗК. Существует объективная необходимость расширения ГДП, работы по оборудованию дополнительных пунктов наблюдений и профиля нивелирования необходимо выполнить до начала горных работ по строительству ПИЛ в 2019 г.

Наблюдения за горизонтальными и вертикальными компонентами СДЗК позволят оценить геодинамический режим участка «Енисейский». Они также необходимы для организации геомеханических исследований в горных выработках ПИЛ, корректировки объемно-планировочного расположения выработок и скважин для размещения контейнеров с РАО и успешного прохождения международной экспертизы результатов исследований в ПИЛ НКМ.

Работа подготовлена в рамках госзадания по теме НИР: «Разработка методов прогнозирования и мониторинга геологической среды для предупреждения геоэкологических угроз от объектов использования атомной энергии».

Литература

1. Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н., Колесников И. Ю., Лобанов Н. Ф., Морозов В. Н., Татаринцев В. Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: «Горная книга», 2011. 592 с.

2. Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Морозов В. Н. Системная оценка факторов, определяющих устойчивость геологической среды при захоронении высокоактивных радиоактивных отходов // X международная конференция «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий». Алматы, Казахстан. — Курчатов: НЯЦ РК, 2018. С. 105—106.
3. Гусева Т. В., Мишин А. В., Сквородкин Ю. П. Современные горизонтальные движения на разных масштабных уровнях // Физика Земли. 1996. № 12. С. 86—91.
4. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 33—42.
5. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах: Методическое руководство. М.: ЦНИИГАиК, 1985.
6. Есиков Н. П. Современные движения земной поверхности с позиций теории деформации. — Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1991. 226 с.
7. Кафтан В. И., Устинов А. В. Повышение точности локального геодинамического мониторинга средствами глобальных навигационных спутниковых систем // Горный журнал. 2015. № 12. С. 32—37.
8. Кафтан В. И., Красноперов Р. И., Юровский П. П. Графическое представление результатов определения движений и деформаций земной поверхности средствами глобальных навигационных спутниковых систем // Геодезия и картография. 2010. № 11. С. 2—7.
9. Кафтан В. И., Сидоров В. А., Устинов А. В. Сравнительный анализ точности локального мониторинга движений и деформаций земной поверхности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 50—58. DOI: 10.7868/S020303061703004.
10. Кафтан В. И., Гвишиани А. Д., Морозов В. Н., Татаринов В. Н. Определение движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижнеканском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса. 2019. № 2.
11. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство Экономических Новостей, 1999. 220 с.
12. Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности // Радиоактивные отходы. 2018. № 3(4). С. 16—29.
13. ГКИНП 01-271-03. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. М., 2003.
14. РБ-019-17. Федеральные норма и правила. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. М., 2017.
15. НП-064-17. Федеральные норма и правила. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. М., 2017.
16. НП-055-14. Федеральные норма и правила. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. М., 2014. 29 с.
17. НП-100-17. Федеральные норма и правила. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. М., 2017. 122 с.
18. Программа проведения исследований в подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) на Нижнеканском массиве для подтверждения проектных параметров безопасности подземного захоронения РАО классов 1 и 2: Решение секции № 1 «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» от 06.04.2016.
19. Разработка и обоснование геодинамической сети режимных наблюдений за современными движениями земной коры в районе возможного размещения ПГЗРО (Красноярский край, Нижнеканский массив): Технический отчет. ГСПИ. Железногорск, 2017. 78 с.
20. Старицына Л. И., Хафизов Р. Р., Забродин С. М. Технический отчет по результатам геодинамического и сейсмического мониторинга в пределах ОИАЭ за первое полугодие 2014 года, этап 2; в 2-х кн. — Железногорск: ООО «ГЕОЛКОМ», 2014. 285 с.
21. Старицына Л. И., Хафизов Р. Р., Забродин С. М. Технический отчет по результатам геодинамического и сейсмического мониторинга в пределах ОИАЭ за первое полугодие 2015 года, этап 4; в 2-х кн. — Железногорск: ООО «ГЕОЛКОМ», 2015. 317 с.
22. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.
23. Татаринов В. Н., Татаринова Т. А. Учет масштабного эффекта при наблюдениях за деформациями земной поверхности спутниковыми навигационными системами // Маркшейдерский вестник. 2012. № 5. С. 15—19.
24. Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по результатам спутниковых наблюдений // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 4. С. 64—79. DOI: 10.21455/gr2018.4-5.
25. Kamnev E. N., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I. Geodynamics aspects of investigations in underground research laboratory (Niznekansk massif) // Eurasian mining. No. 2. Pp. 11—14. 2018. DOI: 10.17580/em.2018.02.03.

26. Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Seelev I. N. Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnekansk Massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes // Atomic Energy. Springer. 2017. Volume 121, Issue 3, pp 203–207. doi:10.1007/s10512-017-0184-5.

Информация об авторах

Татаринов Виктор Николаевич, доктор технических наук, зав. лаб. геодинамики, Геофизический центр РАН (119296, г. Москва, Молодежная, 3), e-mail: v.tatatinov@gcras.ru.

Морозов Владислав Николаевич, профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Геофизический центр РАН (119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3). e-mail: v.morozov@gcras.ru.

Кафтан Владимир Иванович, доктор технических наук, главный научный сотрудник. Геофизический центр РАН (119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3), e-mail: v.kaftan@gcras.ru.

Маневич Александр Ильич, научный сотрудник. Геофизический центр РАН. 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3), e-mail: ai.manevich@yandex.ru

Татаринова Татьяна Александровна, ведущий научный сотрудник, Геофизический центр РАН (119296, г. Москва, Молодежная, 3), e-mail: tata@wdcb.ru.

Библиографическое описание статьи

Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Татаринова Т. А. Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 77–89.

UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY: PROBLEMS OF GEODYNAMIC RESEARCH

Tatarinov V. N.^{1,2}, Morozov V. N.¹, Kaftan V. I.¹, Manevith A. I.¹, Tatarinova T. A.^{1,2}

¹Geophysical Center RAS, Moscow, Russia

²Institute of Physics of the Earth. RAS, Moscow, Russia

Article received 26 February 2019

Geodynamic aspects of research are considered in connection with the start of construction of an underground research laboratory at the territory of the Yenisei Nizhnekanskiy massif. The goal of observations of modern movements of the Earth's crust is formulated based on the methods of space geodesy and high-precision leveling for the period 2019–2024.

In the area of the Yeniseisky Rige, a geodynamic testing area has been created for observing recent movements of the Earth's crust, which includes 30 observation points. For the period from 2010 to 2016 were carried out 5 epochs of observation at the geodynamic test area using global navigation satellite systems (GNSS). To make reliable conclusions on the stability or mobility of the territory, the period of such observations must be at least 10 years. Preliminary observation data processing for 2012–2016 showed that it is also necessary to take into account the cyclical effect of movements of the Earth's crust on the boundary of the West Siberian platform and the Siberian Plate, which consists in the alternation of long periods of weak tectonic movements with short-term periods of activation. The scheme of development of the geodynamic test area in the south direction from the Yeniseisky section is shown. A design of priority research using GNSS-methods and a method of high-precision re-leveling, aimed at predicting the stability of the insulating properties of rocks of the structural-tectonic block containing the underground research laboratory is proposed.

The data of testing GNSS receivers at the reference geodetic baseline of the Federal Center for Geodesy, Cartography and Spatial Data Infrastructure of the Federal Register of State Register are presented. The accuracy of determining the ethalon distances is estimated to be an error of 0,3 mm. Comparison results showed high GNSS measurement accuracy. The root mean square error was 2,4 mm with a 3,0 mm device declared by the manufacturer of GNSS equipment for short baselines less than a kilometer length. The average difference of 0,8 mm does not exceed 30% of the value of the standard error, which indicates the absence of a statistically significant systematic error in the measurements.

The monitoring of the horizontal and vertical components of the movements of the Earth's crust will allow to evaluate the geodynamic regime of the Yeniseisky section. The results will also be useful in organizing geomechanical studies in mine workings of the underground research laboratory, adjusting the space-planning layout of workings and wells to accommodate containers with high-level radioactive waste.

Keywords: high level radioactive waste, underground research laboratory, geodynamics, modern movements of the earth's crust, global navigation satellite systems, tectonic faults.

References

1. Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N., Koleznikov I. Yu, Lobanov N. F., Morozov V. N., Tatarinov V. N. Underground isolation of radioactive waste. M.: Gornaya Kniga, 2011. 592 p. (In Russian).
2. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Morozov V. N. Systematic assessment of factors affecting stability of geological medium in disposal of high-level radioactive waste. *X International conference "Monitoring of nuclear tests and their consequences"*. Almaty. Kazakhstan. Kurchatov: NNC RK, 2018. pp. 105–106. (In Russian).
3. Guseva T. V., Mishin A. V., Skovorodkin Yu. P. Modern horizontal movements at various scales. *Fizika Zemli*, 1996, no. 12, pp. 86–91. (In Russian).
4. Dorofeev A., Bolshov L., Linge I., Utkin S. S., Savelyeva E.A.. Strategic Master-Plan for R&D demonstrating the safety construction, operation and closure of a deep geological disposal facility for radioactive waste. *Radioactive waste*, 2017, no. 1, pp. 33–42. (In Russian).
5. Geodesic methods of Earth crust deformations at geodynamic sites (Guidlines). Moscow, TsNIIGAiK, 1985. (In Russian).
6. Esikov N. P. Modern movements of Earth surface from the viewpoint of deformation theory. Novosibirsk. Novosibirsk, Nauka publ., 1991. 226 p. (In Russian).
7. Kaftan V. I., Ustinov A. V. Enhancing the accuracy of local geodynamic monitoring by application of global satellite navigation systems. *Gorny journal*, 2015, no. 12, pp. 32–37. (In Russian).
8. Kaftan V. I., Krasnoperov R. I., Yurovsky P. P. Graphical presentation of the results of identification of movement and deformation of Earth surface by means of global navigation satellite systems. *Geodesy and Cartography*, 2010, no. 11, pp. 2–7. (In Russian).
9. Kaftan V. I., Sidorov V. A., Ustinov A. V. Comparative analysis of accuracy of monitoring of local movements and deformations of Earth surface using of global navigation satellite systems GPS and GLONASS. *Vulkanologiya i seysmologiya*, 2017, no. 3, pp. 50–58. DOI: 10.7868/S020303061703004. (In Russian).
10. Kaftan V. I., Gviashini A. D., Morozov V. N., Tatarinov V. N. Identification of movements and deformations of Earth crust based on GNSS data at Nizhnekansk geodynamic site in the vicinity of potential radioactive waste disposal site. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, no. 2. (In Russian).
11. Kuzmin Yu. O. Modern geodynamics and assessment of geodynamic risk in subsoil use. Moscow, Economic News Agency publ., 1999. 220 p. (In Russian).
12. Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I. Underground research laboratory: geodynamic and seismotectonic aspects of safety. *Radioactive Waste*, 2018, no. 3(4), pp. 16–29. (In Russian).
13. GKNIP 01-271-03. Guidelines for setting up and reconstruction of urban geodesic networks using GLONASS/GPS satellite systems. Moscow, 2003. (In Russian).
14. RB-019-17. Federal codes and standards. Assessment of initial seismicity of nuclear facility site in process of engineering surveys and studies. Moscow, 2017. (In Russian).
15. NP-064-17. Federal codes and standards. Accounting of external impacts of natural and man-induced origin on nuclear facilities. Moscow, 2017. (In Russian).
16. NP-055-14. Federal codes and standards. Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and main safety requirements. Moscow, 2014, 29 p. (In Russian).
17. NP-100-17. Federal codes and standards. Requirements to the content of safety justification report for radioactive waste disposal facilities. Moscow, 2017, 122 p. (In Russian).
18. Program of studies in the underground research laboratory (URL) in the Nizhnekansk range for confirmation of the design parameters of safety of disposal of class 1 and class 2 RW: Decision of section No. 1 "Environmental and radiation safety of facilities for long-term storage, conservation and disposal of RW" of STC № 10 of State Corporation "Rosatom" of 06.04.2016. (In Russian).

19. Development and justification of geodynamic monitoring network of modern movements of Earth crust in the vicinity of potential DRWDF (Krasnoyarsk kray, Nizhnekansk massif). Technical Report. GSPI. Zhelznogorsk, 2017. 78 p. (In Russian, unpublished).
20. Staritsyna L. I., Khafizov R. R., Zabrodin S. M. Technical report on the results of geodynamic and seismic monitoring at nuclear facility sites in the first half of year 2014, stage 2, in 2 volumes. Zheleznogorsk, LLC "GEOLKOM", 2014. 285 p. (In Russian, unpublished).
21. Staritsyna L. I. Technical report on the results of geodynamic and seismic monitoring at nuclear facility sites in the first half of year 2015, stage 4, in 2 volumes. Zheleznogorsk: LLC "GEOLKOM", 2015, 317 p. (In Russian).
22. Strategy for establishment of a deep radioactive waste disposal facility. *Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 114–120. (In Russian).
23. Tatarinov V. N., Tatarinova T. A. Account for scaling effect in observation of deformation of Earth surface by satellite navigation systems. *Mine Surveying Magazine*, 2012, no 5, pp. 15–19. (In Russian).
24. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I. Modern geodynamics of the southern part of Yeniseysky Ridge based on satellite observations results. *Geophysical research*, 2018, vol. 19, № 894, p. 64–79. DOI: 10.21455/gr2018.4-5. (In Russian).
25. Kamnev E. N., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I. Geodynamics aspects of investigations in underground research laboratory (Nizhnekansk massif). *Eurasian mining*, 2018, no. 2, pp. 11–14. DOI: 10.17580/em.2018.02.03.
26. Tatarinov V. N., Kaftan, V. I., Seelev, I. N. Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnekansk Massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes. *Atomic Energy*, Springer. 2017, vol. 121, issue 3, pp. 203–207. doi:10.1007/s10512-017-0184-5.

Information about authors

Tatarinov Viktor Nikolaevich, doctor of Technical Sciences, Head. lab., Geophysical Center, Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya str., Moscow, 119296, Russia), e-mail: v.tatatinov@gcras.ru.

Morozov Vladislav Nikolaevich, prof, doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Geophysical Center of RAS (3, Molodezhnaya str., Moscow, 119296, Russia), e-mail: v.morozov@gcras.ru

Kaftan Vladimir Ivanovich, doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Geophysical Center of RAS (3, Molodezhnaya str., Moscow, 119296, Russia), e-mail: v.kaftan@gcras.ru

Manevich Alexander Iliyich, researcher. Geophysical Center of RAS (3, Molodezhnaya str., Moscow, 119296, Russia), e-mail: ai.manevich@yandex.ru

Tatarinova Tatyana Aleksandrovna, researcher, Geophysical Center RAS (3, Molodezhnaya str., Moscow, 119296, Russia), e-mail: tata@wdcb.ru.

Bibliographic description

Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kaftan V. I., Manevith A. I., Tatarinova T. A. Underground Research Laboratory: Problems of Geodynamic Research. *Radioactive Waste*, 2019, no. 1(6), pp. 77–89. (In Russian)