

ПОДЗЕМНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ 12-ЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОВРЕМЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ СРЕДСТВАМИ ГНСС

В. Н. Татаринов^{1,2}, В. И. Кафтан¹, А. И. Маневич^{1,3}, Р. В. Шевчук^{1,2,3}, С. М. Забродин¹

¹Геофизический центр РАН, Москва

²Институт физики Земли РАН, Москва

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

Статья поступила в редакцию 15 октября 2022 г.

В статье приведены результаты обобщения геодезических наблюдений средствами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) за современными движениями и скоростями деформаций земной коры в районе строительства подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) в пределах Нижнеканского массива за период с 2010 по 2022 год. Показано, что разработанная методика ГНСС-наблюдений позволяет обеспечить высокую точность определения скоростей современных горизонтальных движений на уровне 2,4 мм. Приведена структурно-кинематическая модель блоковых движений и деформаций, включающая расположение участков максимальных скоростей сжимающих и растягивающих деформаций. Наибольшие показатели для горизонтальных движений были получены для пунктов, расположенных в зоне динамического влияния Муратовского и Правобережного разломов. Данные ГНСС-наблюдений показали, что район стабилен в геодинамическом плане, максимальные скорости деформаций не превышают $5 \cdot 10^{-7}$ в год. Доказан циклический характер развития современных движений, который существенно усложняет геодинамическую интерпретацию результатов и принятие окончательных выводов о тектонической активности района строительства ПИЛ.

Ключевые слова: Нижнеканский массив, подземная исследовательская лаборатория, захоронение высокоактивных РАО, глобальные навигационные спутниковые системы, геодинамика, современные движения земной коры, деформации, радиоактивные отходы.

Введение

В пределах Нижнеканского гранитогнейсового массива, граничащего с Атамановским отрогом Енисейского кряжа, в настоящее время начато строительство уникального объекта — подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) для обоснования безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) [1], [2]. Район находится в зоне сочленения крупных региональных тектонических структур — древней

Сибирской платформы, эпигерцинской Западно-Сибирской плиты и Западно-Саянской орогенной складчатой области [3], [4]. Изоляционные свойства породного массива на период радиобиологической опасности РАО, который превышает 10 тыс. лет, определяются историей геодинамической эволюции, включая современные движения земной коры (СДЗК), регистрируемые на текущем этапе тектонического

развития района. Известно, что данный режим часто наследует ранее существовавший, поэтому инструментально подтвержденные данные о параметрах СДЗК в комплексе с геологическими показателями позволяют оценивать возможные скорости деформации среды на длительные периоды времени.

Наиболее эффективным средством изучения СДЗК в настоящее время являются ГНСС — GPS и ГЛОНАСС [5]. В 2010—2012 гг. сотрудниками Геофизического центра РАН совместно с геологами Горно-химического комбината был создан геодинимический полигон (ГДП), включающий 30 пунктов для ГНСС-измерений параметров СДЗК [6]—[8]. За период с 2010 по 2022 г. на этом полигоне были накоплены уникальные временные ряды данных ГНСС-наблюдений. В статье подводятся итоги работ за 12-летний период и приводятся результаты их системного анализа и обобщения. Процесс организации мониторинга при захоронении РАО регламентируется целым рядом существующих норм и правил, которые

требуют не только максимально возможной достоверности измерений, но также и получения надежных оценок параметров СДЗК и деформаций [9], поэтому были выполнены эксперименты по оценке точности ГНСС-наблюдений, результаты которых кратко описаны ниже.

Геодинимическая сеть в районе строительства ПИЛ

На конец 2022 года спутниковая геодезическая сеть ГДП состоит из 39 ГНСС-пунктов, установленных на территории размерами в широтном направлении ~ 35 км, а в меридиональном — ~ 15 км. Расстояния между пунктами варьируют от 500 м до 7 км. Структура геодезической сети ГДП показана на рис. 1. Она охватывает практически все крупные тектонические нарушения в районе, а также пересекает границу Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы [10]. Крупными тектоническими нарушениями в районе являются субмеридиональные разломы:

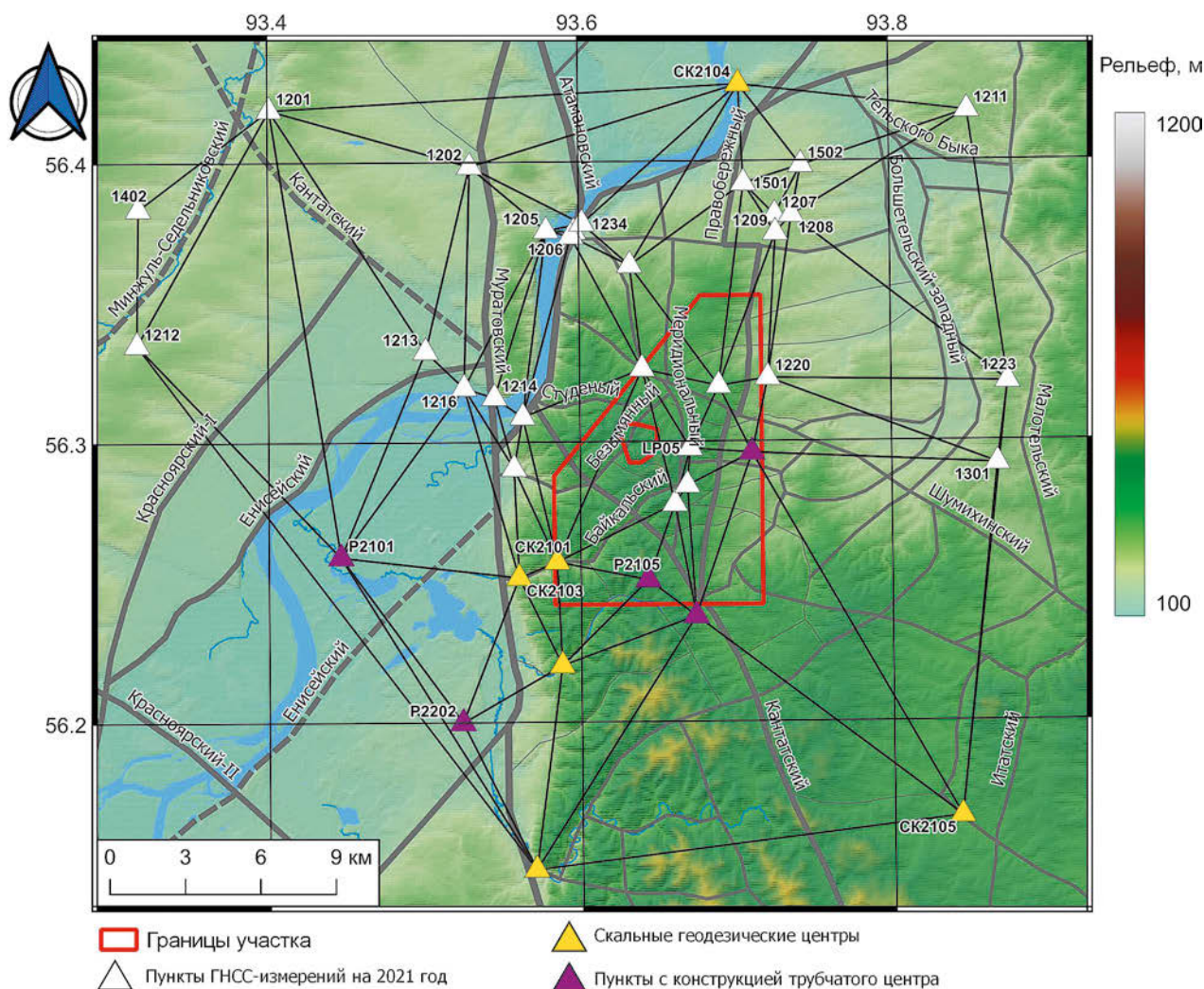


Рис. 1. Схема геодезического полигона для ГНСС-наблюдений за СДЗК с учетом расширения в южном направлении в 2022 году

Муратовский, Атамановский, Правобережный и Большетельский [11], [12]. В соответствии с генеральным направлением ориентировки этих нарушений при планировании структуры геодинамической сети была выбрана схема в виде профиля, пересекающего с запада на восток указанные разломы и зону контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты [6]. Пункты ГНСС-наблюдений представляют собой надежно закрепленные устройства, конструкция которых отвечает существующим нормативным требованиям [9] и обеспечивает надежность закрепления на них ГНСС-антенн и приемников при полевых измерениях (рис. 2) [4], [6].

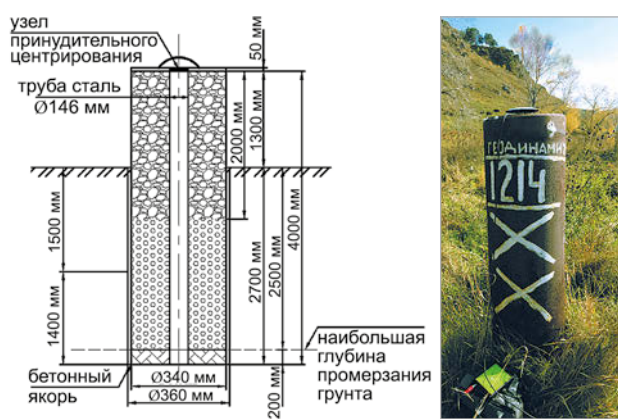


Рис. 2. Конструкция геодезического пункта ГНСС-наблюдений № 1214

Геодезическая ГНСС-сеть в районе была создана в 2010–2012 гг. с целью изучения сейсмо-тектонических условий района размещения Изотопно-химического завода ГХК и вначале состояла из 30 пунктов. Полученные данные использовались также и при подготовке проектной документации строительства объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив) во ВНИПИпромтехнологии. По отношению к участку расположения ПИЛ, на тот момент структура геодезической сети не была оптимальной, т. к. не был охвачен южный сектор (рис. 1), поэтому впоследствии было принято решение по ее оптимизации. Детальные рекогносцировочные работы были проведены в летний период 2021 г. в рамках выполнения проекта РНФ № 18-17-00241. Ввиду отсутствия финансирования было принято решение устанавливать реперы скального типа, материальные затраты на которые на порядок ниже, на выходах кристаллических пород на земную поверхность. При поиске скальных обнажений на местности использовался квадрокоптер *DJI Mavic Mini*. В качестве полезной нагрузки на

него был закреплен двухосевой подвес и экшн-камера в версии сборки квадрокоптера.

В 2021–2022 гг. было установлено 11 новых геодезических пунктов, из которых 6 — типа скального геодезического центра (рис. 3), а 5 — конструкции трубчатого знака (рис. 2).



Рис. 3. Общий вид скальных геодезических центров во время выполнения ГНСС-измерений на геодинамическом полигоне Нижнеканского массива

Метод измерений и обработки данных

Цель полевых ГНСС-наблюдений заключалась в получении количественных параметров современных вертикальных и горизонтальных движений земной коры, обусловленных тектоническими процессами в радиусе до 15 км от пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО), которые необходимы для:

- выявления активных тектонических структур и опасных геодинамических зон;
- расчета величин и направленности современных движений крупных тектонических нарушений и на границах структурных блоков;
- прогноза скоростей деформаций в пределах участка «Енисейский»;
- задания граничных условий для численного моделирования напряженно-деформированного состояния в ближней зоне ПГЗРО.

Для обеспечения высокой точности использовались двухчастотные и преимущественно двухсистемные ГНСС-приемники геодезического класса, регистрирующие сигналы одновременно двух навигационных систем — ГЛОНАСС и GPS. Сегодня такая конфигурация ГНСС-аппаратуры обеспечивает точность определения горизонтальных и вертикальных смещений на уровне первых миллиметров [12]. Наблюдения на пунктах ГДП проводились в формате полевых кампаний с частотой 1–2 раза в год. Продолжительность сеанса одновременных наблюдений составляла от 4 до 16 часов. Каждый цикл наблюдений содержал несколько расстановок ГНСС-приемников, образующих фрагменты единой сети и имеющих взаимные перекрытия. Это обусловлено количеством комплектов ГНСС-аппаратуры, участвующей в наблюдениях,

одновременно это способствует достижению более высокой точности измерений. В различные эпохи для наблюдений использовалось от 8 до 12 комплектов ГНСС-приемников. Для ослабления влияния временных задержек в ГНСС-аппаратуре в каждом цикле наблюдений на конкретный пункт устанавливался один и тот же комплект приемник-антенна. При этом также существенно снижались ошибки положения фазовых центров антенн ГНСС-приемников [13].

Смещения и деформации земной поверхности определялись путем математической обработки временных разностей измерений текущего и начального циклов. При анализе повторных измерений на ГДП использовалась оригинальная методика разностного уравнивания кинематической спутниковой геодезической сети [14]. Следует подчеркнуть, что наблюдения проводились по двум спутниковым системам — ГЛОНАСС и GPS. Расчеты показали, что их точность при доведении группировки ГЛОНАСС до сегодняшнего состава GPS может повыситься в полтора раза.

Методы определения деформаций в пределах конечных элементов пространственных геодезических сетей разработаны и описаны, например, в [15]. Основными характеристиками анализа ГНСС-данных были инвариантные по отношению к системе координат горизонтальные растяжения-сжатия по главным осям деформации конечного элемента и площадного растяжения-сжатия — горизонтальная дилатация. Они позволяют оценивать и прогнозировать степень подвижности верхней части земной коры и связанных с ней процессов деструкции и разуплотнения горных пород на площадке ПЗРО. Горизонтальные смещения U_n и U_e ГНСС-пунктов определяют для каждого цикла наблюдений по отношению к начальной эпохе T_0 как разность плановых координат n и e в проекции УТМ по следующим формулам:

$$U_{n_i} = n_i - n_0, \quad U_{e_i} = e_i - e_0, \quad (1)$$

где индекс i обозначает текущую эпоху измерений.

В случае использования глобальной координатной системы отсчета применяется эквивалентный подход получения внутренних смещений вычитанием из каждого U_j , определенного в глобальной системе отсчета, среднего значения \bar{U} , характеризующего общую для всех пунктов сети тенденцию глобальной тектоники, для каждой эпохи измерений:

$$u_{n_j} = U_{n_j} - \bar{U}_n, \quad u_{e_j} = U_{e_j} - \bar{U}_e, \quad (2)$$

где индекс j является порядковым номером пункта ГНСС-наблюдений.

Деформации конечных элементов сети определялись из решения тензора горизонтальной деформации, оси n и e направлены на север и восток:

$$\mathbf{T}_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_n & \varepsilon_{ne} \\ \varepsilon_{en} & \varepsilon_e \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где элементы тензора равны $\varepsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}$, $\varepsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e}$ и

$$\varepsilon_{en} = \varepsilon_{ne} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} \right), \quad \text{а} \quad \frac{\partial u_n}{\partial e} - \frac{\partial u_e}{\partial n} = \gamma_{ne} = \gamma_{en} -$$

относительный сдвиг.

Для построения карт для площади района исследований рассчитывались следующие инвариантные деформационные характеристики:

1) главные деформации ε_1 и ε_2 :

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_n + \varepsilon_e \pm \sqrt{(\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2} \right]. \quad (4)$$

2) дилатация:

$$\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2. \quad (5)$$

3) полный сдвиг:

$$\gamma = \left[(\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Проверка точности наблюдений

Точность ГНСС-измерений обусловлена многими природными и аппаратурными факторами, в том числе не поддающимися строгой коррекции. Вопрос достоверности нахождения координат и длин базисных линий между пунктами наблюдений является определяющим в геодинамических исследованиях, когда скорости СДЗК лишь незначительно превышают разрешающую способность аппаратуры. Согласно ГОСТ Р 53606-2009 точность определения положения геодезического пункта подлежит обязательному контролю с использованием различных методов, комплексное применение которых является гарантией его надежности. Одним из основных и наиболее объективных методов контроля точности является метод эталонов, в соответствии с которым производится сравнение выполненных измерений (абсолютных и относительных координат, высот, длин и азимутов базисных линий) с эталонными.

В связи с этим было проведено тестирование применяемых на Нижнеканском массиве ГНСС-приемников на эталоне, длина которого определена с высокой точностью, а именно — на геодезическом базисе Федерального центра

геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных Росреестра [16]. Длины его линий определяются регулярно высокоточными электронными измерительными средствами: лазерными дальномерами и тахеометрами, со средней квадратической ошибкой ~0,3 мм. Схема эталонного базиса представлена на рис. 4в.

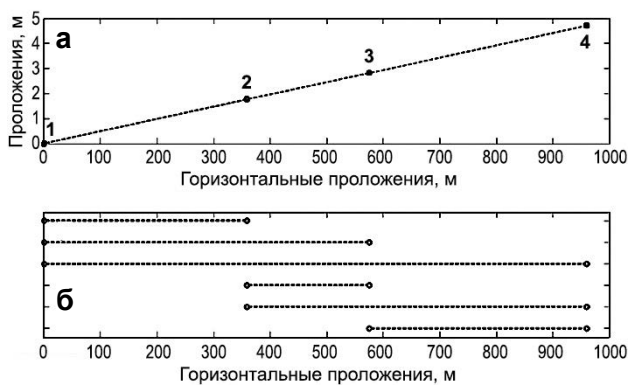


Рис. 4. Вертикальный профиль эталонного базиса (а), измеренные во всех комбинациях фрагменты базиса (б) и карта его расположения (в). Звезды – пункты установки аппаратуры

Технические характеристики аппаратуры, участвующей в эксперименте, представлены в табл. 1.

Была использована приведенная ниже методика обработки наблюдений по методу наименьших квадратов. Сначала составляются уравнения поправок v , коэффициенты

которых — вклад каждого комплекта аппаратуры в измеренное расстояние (горизонтальное проложение) [17]:

$$v = Ax + l, \tag{7}$$

где A — матрица коэффициентов уравнений поправок размерностью $n \times m$;

x — вектор неизвестных вероятнейших значений ошибки комплекта аппаратуры размерностью $m \times 1$;

l — вектор свободных членов, равный разностям измеренных и эталонных горизонтальных проложений ($d_{\text{ИЗМ}i} - d_{\text{ЭТ}i}$), размерностью $n \times 1$.

Решение системы уравнений (7) осуществляется при условии минимума суммы квадратов поправок:

$$v^T v = \min.$$

Ниже приведен случай равноточных измерений без участия весовых коэффициентов в связи с однородностью используемой ГНСС-аппаратуры. Схема проанализированных фрагментов представлена на рис. 4а, б. Найдем вероятнейшие оценки ошибок x из решения уравнения (7) по методу наименьших квадратов, решая систему нормальных уравнений:

$$x = -(A^T A)^{-1} A^T l = -QL \tag{8}$$

где Q — ковариационная матрица неизвестных; L — свободный член нормальных уравнений.

По правилам уравнивания наблюдений рассчитаем СКО единицы веса:

$$\mu^2 = (v^T Q^{-1} v) / (n - m) \tag{9}$$

и СКО полученных неизвестных:

$$m_i^2 = \mu^2 \cdot q_{ii}, \tag{10}$$

где q_{ii} — диагональные элементы матрицы Q .

В итоге были получены разности измеренных и эталонных горизонтальных проложений (табл. 2), которые составили значения векторов свободных членов для решения уравнений (7). Общая СКО оценивалась по формуле Гаусса:

Таблица 1. Технические характеристики аппаратуры, участвующей в эксперименте по оценке точности

Производитель	Тип приемника	Тип антенны	Номер пункта установки	Заявленная точность в статическом режиме из технической документации производителя
Topcon Positioning Systems	Topcon Hiper SR	Встроенная. Интегрированная высокоточная с технологией Fence Antenna	1, 3	в плане ±(3 мм ÷ 0,8 мм/км); по высоте ±(4 мм ÷ 1,0 мм/км)
Javad GNSS	Javad Delta 3N	Внешняя MVEGA152GNSSA	2	в плане ±(3 мм ÷ 0,1 мм/км); по высоте ±(3,5 мм ÷ 0,4 мм/км)
Trimble	Trimble Geo 7X	Внешняя Zephyr 3 Rover	4	в плане ±(3 мм ÷ 0,5 мм/км); по высоте ±(3,5 мм ÷ 0,5 мм/км)

$$m_d = \sqrt{\frac{d^2}{n}}, \quad (11)$$

где квадратные скобки в числителе обозначают Гауссову сумму чисел. Значение обобщенной СКО горизонтального проложения представлено в последней строке табл. 3.

СКО вклада отдельного комплекта аппаратуры $m_{ан}$ получена по стандартной формуле теории ошибок:

$$m_{ан} = \frac{m_d}{\sqrt{2}} = 2,9 \text{ мм} \quad (12)$$

Результаты оценки точности представлены в табл. 3. Суммированием «измеренных» значений ошибок и их поправок из уравнивания проверена эффективность использованной методики (см. табл. 2). Можно отметить, что пять из шести «измеренных» ошибок после этого уменьшились. Исключение составило первое измерение. Общая СКО разности (d_{ij}) по формуле Гаусса после уравнивания равна 3,5 мм. Заметим, что она удовлетворяет оценкам, заявленным фирмами-производителями ГНСС-аппаратуры, — 3–5 мм. Соответственно, для вклада одного комплекта аппаратуры СКО после уравнивания равна 2,4 мм, тогда как до этого оценка составила 2,9 мм. Результаты исследования показали эффективность предлагаемой методики оценки точности и возможность ее применения в качестве метрологической проверки измерений.

Таблица 2. Значения разностей измеренных и эталонных горизонтальных проложений (истинные ошибки) [15]

Измерение	Истинная ошибка, мм	Результат уточнения $d_{ij} + v_{ij}$, мм
d_{12}	3,2	5,6
d_{13}	7,3	5,0
d_{14}	4,2	4,1
d_{23}	0,6	0,5
d_{24}	2,0	-0,4
d_{34}	-3,4	-1,0
m_d	4,0	3,5

Таблица 3. Результаты оценки вклада каждого комплекта ГНСС-аппаратуры [15]

Пункт	Вероятнейшая ошибка, мм	СКО вероятнейшей ошибки, мм
1	-5,0	2,1
2	0,6	2,1
3	-0,1	2,1
4	-0,9	2,1

Результаты анализа и интерпретации ГНСС-данных

Результаты повторных серий ГНСС-наблюдений за 12-летний период были системно обобщены и проанализированы. На рис. 5 показано поле среднегодовых скоростей горизонтальных СДЗК на эпоху 2019 года [8], построенное на основе интерполяции. На карте также представлены наиболее крупные структурные блоки. Четко видно изменение направления движений блоков, которые в центральной и северной частях района (структурные блоки IV и V) меняют направления с субширотного на субмеридиональное, что может говорить о возможном их сдвиговом характере по Муратовскому и Атамановскому разломам. Структурные блоки VI, VIII, IX, X, XI, ограниченные Канско-Атамановским (с севера) и Муратовским (с запада) разломами, имеют максимальные градиенты движений со скоростями до 3,5 мм/год. Смена направлений горизонтальных смещений с субширотного на субмеридиональное в пределах участка «Енисейский» совпадает с Шумихинским разломом. Интерес вызывает разнонаправленность движений по границе, проходящей по Атамановскому отрогу.

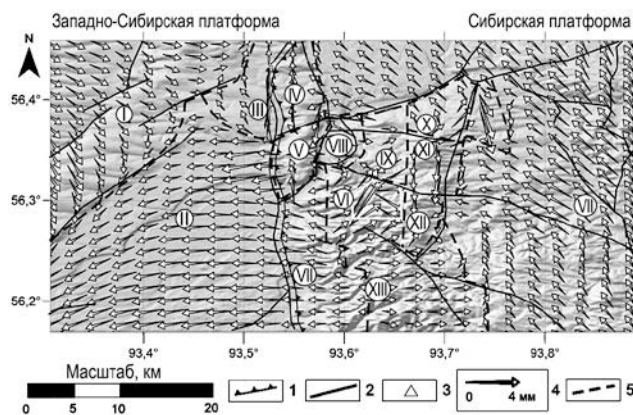


Рис. 5. Поле средних скоростей современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа: 1 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные тектонические разломы; 3 – ГНСС-пункты; 4 – векторы скоростей СДЗК ГНСС-пунктов, мм/год; 5 – активные геодинамические зоны, соответствующие границам структурных блоков с различными кинематическими характеристиками.

Римскими цифрами на схеме обозначены тектонические блоки, выделенные по данным ГНСС-наблюдений [8]

Интерполяционная модель согласуется с результатами структурно-геологических и геодинамических исследований в данном районе. Скорость сближения Сибирской платформы и

Западно-Сибирской плиты в зоне взаимодействия южной части Енисейского кряжа можно оценить величиной 2–4 мм/год, причем скорость движений Западно-Сибирской плиты ниже на 1–2 мм/год, чем Сибирской платформы. Возможно, с этим связано воздымание Атамановского отрога на неотектоническом этапе развития, когда произошло гипсометрическое разобщение древней Сибирской платформы и молодой Западно-Сибирской плиты. Первая оказалась поднятой до абсолютных отметок ~700–800 м, а вторая — относительно опущенной на 120–200 м [19]. Атамановский хребет воздымается, что подтверждает унаследованный характер движений, по крайней мере с четвертичного периода. В результате этого блок VII движется на запад, а блок XIII — на восток.

Также был установлен циклический характер развития геодинамических движений в этой зоне, который на длительный период времени сглаживает «пиковые» значения. В 2013–2014 гг. была зафиксирована активизация геодинамического режима, проявившаяся в смене знака деформаций сжатия и растяжения на западном и восточном берегах р. Енисей [6].

Были также построены карты, представляющие различные кинематические характеристики ближнего района и дальней зоны ПГЗРО с учетом их блокового строения (рис. 6–8) за период с 2012 по 2019 год. На рис. 6 показаны оси главных деформаций: видно четкое деление территории на участки, где преобладают растягивающие и сжимающие деформации, в т. ч. на участке «Енисейский».

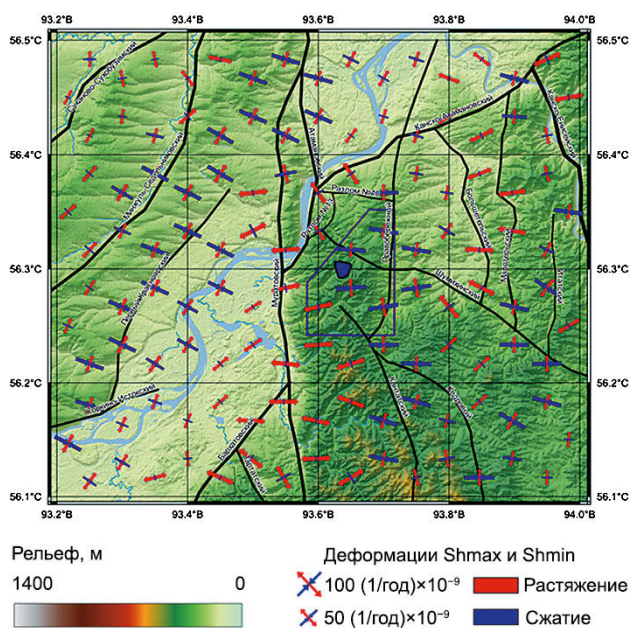


Рис. 6. Оси деформаций по данным ГНСС-наблюдений за 2012–2019 гг.

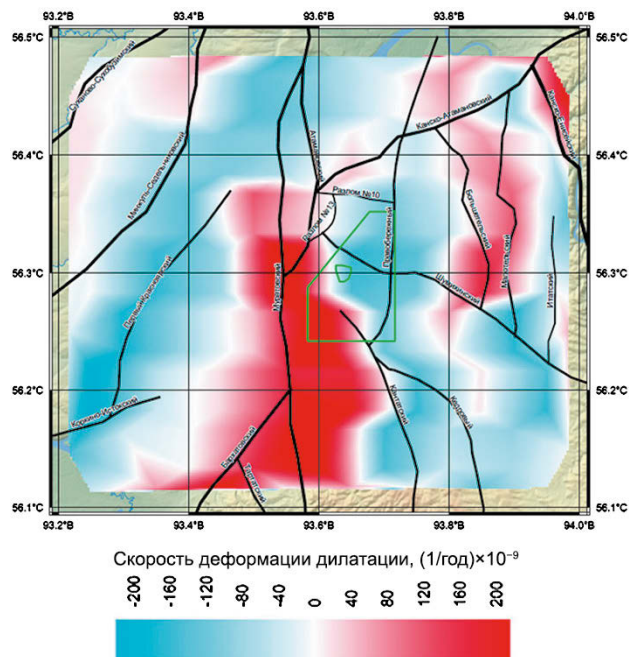


Рис. 7. Скорость дилатации (изменения площади поверхности) по данным ГНСС-наблюдений за 2012–2019 гг.

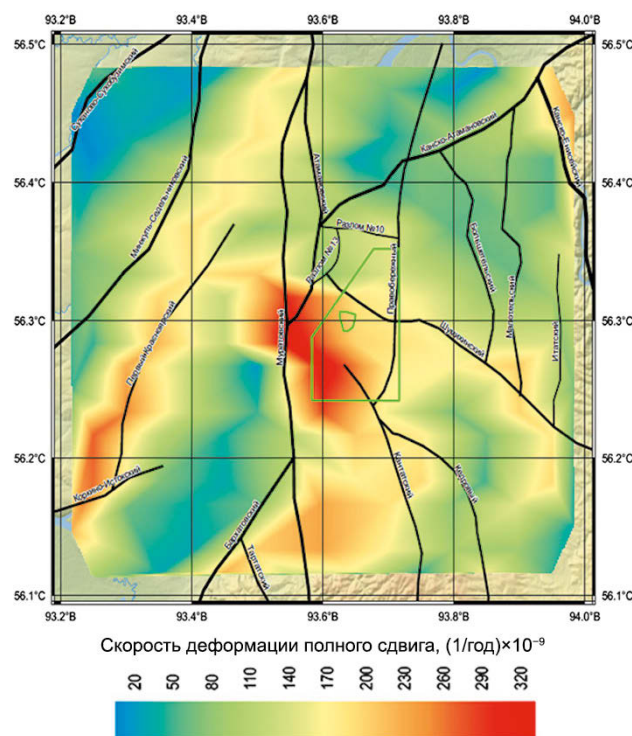


Рис. 8. Скорость деформации полного сдвига по данным ГНСС-наблюдений за 2012–2019 гг.

На рис. 7 и 8 представлены распределения дилатации и деформации полного сдвига, характеризующие соответственно площадное расширение или сжатие и сдвиг без изменения площади. Деформация полного сдвига, в отличие от дилатации, позволяет оценить тип кинематических смещений земной поверхности.

Примечательно то, что мощные зоны дилатации сжатия со значениями $\Delta \approx -1,6 \cdot 10^{-6}$ в узле пересечения Правобережного и Канско-Атамановского разломов в северо-восточной части района и область растягивающих деформаций $\Delta \approx 8 \cdot 10^{-6}$ на западе оказались связанными с зонами наибольших значений деформаций сдвига. В то же время вся южная часть района имеет близкие к нулевым скорости горизонтальных деформаций сдвига, что, вероятно, связано преимущественно с вертикальной направленностью движений или смещений типа надвигов. Вместе с тем зоны Муратовского и Атамановского разломов находятся в области минимальных скоростей деформации сдвига.

На наш взгляд, из всех деформационных характеристик наиболее показательной оказалась площадная деформация, или дилатация, которая характеризует изменения площади земной поверхности: увеличение (растяжение) или уменьшение (сжатие). По этой причине были построены карты («временные срезы») динамики изменения дилатации на весь период измерений [18]. Они представлены на рис. 9.

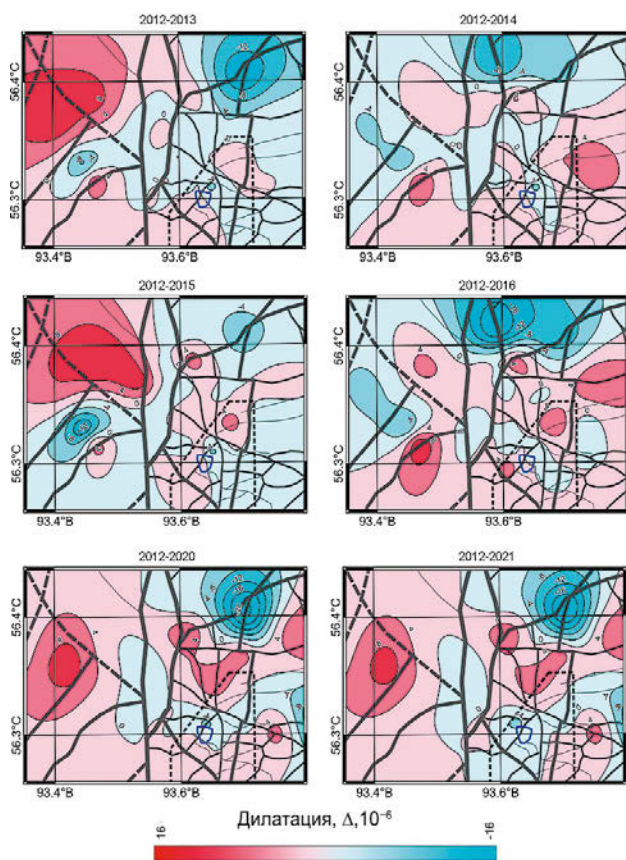


Рис. 9. Динамика изменения дилатации по эпохам ГНСС-наблюдений. Серые линии – тектонические нарушения (показаны на рис. 1), красный цвет – участки поверхностного растяжения, синий – поверхностного сжатия [18]

Главные особенности их пространственно-временного изменения следующие:

1. В целом за период наблюдений с 2012 по 2021 год значения дилатации не превышали по модулю $(1,6 \div 8) \cdot 10^{-5}$. Площадка строительства ПИЛ находится в зоне минимальных значений скоростей движений на границе растягивающих и сжимающих деформаций.

2. При этом характер изменения положения зон максимального сжатия и растяжения, вероятно, связанных с глубинной геодинамикой верхней части земной коры, носил циклический характер [6]. Так, например, в эпоху 2012–2014 гг. зона растягивающих деформаций, зарегистрированная в западной части в эпоху 2012–2013 гг. (рис. 9а), исчезла, но появилась новая – на востоке (рис. 9б). В 2015 г. общая картина распределения зон сжатия и растяжения фактически вернулась к эпохе 2012–2013 гг. (рис. 9в).

3. Далее, в 2016 г. (рис. 9г) характер распределения поля дилатации с незначительными отклонениями повторяет эпоху 2012–2014 гг. (рис. 9б), т. е. продолжительность цикла режима сжатие–растяжение составила приблизительно 2 года.

4. Через четыре года – в 2020 и 2021 гг. – вид распределения поля дилатации слегка изменился (рис. 9д, е), но в целом остался близок к эпохе 2012–2013 гг. При этом зоны максимальных отрицательных дилатаций практически не изменяют положения, что говорит об их природном характере.

Заключение

Впервые для северо-западной части Нижнеканского массива, находящейся на контакте двух крупнейших тектонических структур – Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты, измерены скорости горизонтальных движений и деформаций земной коры и доказан циклический характер развития геодинамического режима, связанный с силовым взаимодействием региональных структур.

Полученные результаты позволяют утверждать о взаимосвязи современных движений с наиболее крупными тектоническими структурами района – Приенисейским (Муратовским), Атамановским, Большетельским и Правобережным разломами, образующими иерархическое блоковое строение. Это соответствует основным закономерностям распределения величин СДЗК в северной части Нижнеканского массива, nasledующих в основном направленность движений, существовавших по крайней мере в плейстоцене и голоцене. Доказательством являются растягивающие напряжения в районе уступа

Атамановского отрога Енисейского кряжа, испытывающего положительные вертикальные движения (верхняя часть разреза расширяется). Внутри выделенных тектонических блоков получены относительно невысокие скорости современных горизонтальных движений земной коры. Сравнивая величины дилатации с критериями, приведенными в литературе для геодинамически активных зон ($\Delta = \pm (5 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-5})$ в год), можно утверждать, что район характеризуется относительно слабыми деформациями верхней части земной коры. В целом же территория характеризуется субширотным сжатием по азимуту $\sim 100\text{--}110^\circ$.

В представленной модели современные движения носят циклический пространственно-временной характер, а их источниками являются глубинные геодинамические процессы кинематического взаимодействия блоков в зоне аккрекции между Западно-Сибирской плитой и Сибирской платформой. Сопоставление динамики миграции зон «дефицита смещений», приведенного в работе [18], со схемой блокового строения позволит в дальнейшем предложить гипотезы о глубинных механизмах наблюдаемых геодинамических явлений в районе, а также оценивать накопления поврежденности породного массива в районе строительства ПГЗРО.

Источники финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов» (проект № 18-17-00241).

Литература

1. Абалкина И. Л., Большов Л. А., Капырин И. В., Линге И. И., Савельева Е. А., Свительман В. С., Уткин С. С. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние : Препринт ИБРАЭ № 2019-03. — М. : ИБРАЭ РАН, 2019. 40 с.

2. 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.

3. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) //

Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

4. Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н., Колесников И. Ю., Лобанов Н. Ф., Морозов В. Н., Татаринов В. Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов. — М. : Горная книга, 2011. 592 с.

5. 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.

6. 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.

7. 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. 2017. Vol. 121. Iss. 3. Pp. 203—207. DOI: 10.1007/s10512-017-0184-5.

8. Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Дзэбоев Б. А., Лосев И. В. Скорости современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа по результатам ГНСС-измерений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 73—77. DOI: 10.31857/S2686739720070075.

9. 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. — М. : Ростехнадзор, 2017.

10. Труды Радиевого института им. В. Г. Хлопина. Т. XI. — Санкт-Петербург, 2006. 135 с.

11. Лукина Н. В. Нижнеканский гранитоидный массив: новейшие и современные тектонические движения, морфология и кинематика активных разломов и мегатрещин, современное поле напряжений. Возможности безопасного захоронения ВАО / В сб.: Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО. Материалы КНТС. — СПб., 1999. С. 49—59.

12. 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/S020303061703004X.

13. Кафтан В. И. Временной анализ геопространственных данных: Кинематические модели : Дисс. докт. техн. наук. — Москва, МГУПС, 2003. 285 с.

14. Кафтан В. И., Устинов А. В. Повышение точности локального геодезического мониторинга средствами глобальных навигационных спутниковых систем // Горный журнал. 2015. № 10. С. 32–38. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.06.
15. Есиков Н. П. Современные движения земной поверхности с позиций теории деформации. — Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1991. 226 с.
16. 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 Нижне-Канском геодезическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 83–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-15-1-83-94.
17. Кафтан В. И., Татаринов В. Н., Маневич А. И., Прусаков А. Н., Кафтан А. В. Оценка точности ГНСС-наблюдений на эталонном базисе как средство проверки измерительной аппаратуры локального геодезического мониторинга // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 37–46. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-37-46.
18. Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Минаев В. А., Устинов С. А., Шевчук Р. В. Геодезическая модель северной части Нижнеканского массива: разломная тектоника, деформации, изоляционные свойства пород // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 67–74.

Информация об авторах

Татаринов Виктор Николаевич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией геодезии, Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3); Институт физики Земли РАН (123242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1), e-mail: v.tatatinov@gcras.ru.

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

Маневич Александр Ильич, научный сотрудник лаборатории геодезии, Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3); Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4), e-mail: ai.manevich@yandex.ru.

Шевчук Роман Васильевич, младший научный сотрудник лаборатории геодезии, Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3); Институт физики Земли РАН (123242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1); Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4), e-mail: shevchuk.002@mail.ru.

Забродин Сергей Михайлович, главный специалист, Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3), e-mail: zsm@yandex.ru.

Библиографическое описание статьи

В.Н.Татаринов,В.И.Кафтан,А.И.Маневич,Р.В.Шевчук,С.М.Забродин Подземная исследовательская лаборатория: результаты 12-летних наблюдений за современными движениями земной коры средствами ГНСС//Радиоактивные отходы. 2022.№4(21).С.58–69.DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-58-69.

UNDERGROUND RESEARCH FACILITY: FINDINGS FROM 12-YEAR GNSS OBSERVATIONS OF MODERN CRUST MOVEMENTS

Tatarinov V. N.^{1,2}, Kaftan V. I.¹, Manevich A. I.^{1,3}, Shevchuk R. V.^{1,2,3}, Zabrodin S. M.¹

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

²Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³National Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russia

Article received on October 15, 2022

The paper considers geodetic observations focused on modern earth crust movements and rates of its deformations carried out over the period from 2010 to 2022 in the siting area of an underground research facility (URF) in the Nizhnekanskiy rock mass and summarizes their findings. The study demonstrates that the developed GNSS observation method can be used to measure the velocities of modern horizontal movements with a high accuracy at the level of 2.4 mm. It also presents a structural-kinematic model of block movements and deformations, including the spatial layout of areas with maximum velocities of compressive and tensile deformations. The highest rates of horizontal

movements were identified in the dynamic influence zone of the Muratov and Pravoberezhny faults. In general, GNSS observations have shown that the region could be considered geodynamically stable, the maximum strain rates did not exceed $5 \cdot 10^{-7}$ per year. The study also evidences the cyclic nature of the evolving modern movements, which significantly complicates the adoption of a final conclusion on the geodynamic activity of the URF siting region.

Keywords: Nizhnekanskiy rock mass, underground research facility, high-level waste, global navigation satellite systems, geodynamics, modern movements of the Earth's crust, deformations, radioactive waste.

Financial support

The study was supported by a grant from the Russian Scientific Foundation for the Research on the Rock Mass Stability Based on a Comprehensive Analysis of Geodynamic Processes for Geologically Safe Underground Radioactive Waste Disposal (project No. 18-17-00241).

References

1. Abalkina I. L., Bolshov L. A., Kapyrin I. V., Linge I. I., Savelyeva Ye. A., Svitelman V. S., Utkin S. S. *Obosnovaniye dolgovremennoy bezopasnosti zakhroneniya OYAT i RAO na 10 000 i boleye let: metodologiya i sovremennoy sostoyaniye* [Long-term SNF and RW Disposal Safety Demonstration Covering a Timeframe of Over 10,000 Years: Methodology and State of the Art]. Preprint IBRAE № 2019-03. Moscow, IBRAE RAS Publ., 2019. 40 p.

2. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. *Strategicheskii master-plan issledovaniy v obosnovanie bezopasnosti sooruzheniya, ehkspluatatsii i zakrytiya punkta glubinnogo zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 32–41.

3. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. *Otsenka sostoyaniya geologicheskoi sredy uchastka Eniseiskii (Krasnoyarskii krai)* [Assessing the State of the Geological Environment at the Yeniseyskiy Site (Krasnoyarsk Region)]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 46–62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

4. Anderson Ye. B., Belov S. V., Kamnev Ye. N., Koleznikov I. Yu., Lobanov N. F., Morozov V. N., Tatarinov V. N. *Podzemnaya izolyatsiya radioaktivnykh otkhodov* [Underground Disposal of Radioactive Waste]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2011. 592 p.

5. Kaftan V. I., Sidorov V. A., Ustinov A. V. *Sravnitel'nyy analiz tochnosti lokal'nogo monitoringa dvizheniy i deformatsiy zemnoy poverkhnosti s ispol'zovaniyem global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem GPS i GLONASS* [Comparative Analysis of Monitoring Accuracy Considering Local Movements and Deformations of the Earth's Crust Using Global Navigation Satellite Systems

GPS and GLONASS]. *Vulkanologiya i seismologiya — Volcanology and seismology*, 2017, no. 3, pp. 50–58. DOI: 10.7868/S020303061703004.

6. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I. *Sovremennaya geodinamika yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha po rezul'tatam sputnikovykh nablyudeniy* [Modern Geodynamics in the Southern Part of the Yeniseyskiy Ridge Based on Satellite Observations]. *Geofizicheskiye issledovaniya — Geophysical Research*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 64–79. DOI: 10.21455/gr2018.4-5.

7. 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*, 2017, vol. 121, iss. 3, pp. 203–207. DOI: 10.1007/s10512-017-0184-5.

8. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I., Dzeboev B. A., Losev I. V. *Skorosti sovremennykh gorizontallykh dvizheniy zemnoy kory v yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha po rezul'tatam GNSS-izmereniy* [Velocities of Modern Horizontal Earth Crust Movements in the Southern Part of the Yeniseyskiy Ridge According to GNSS Measurements]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle — Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 493, no. 1, pp. 73–77. DOI: 10.31857/S2686739720070075.

9. RB-019-18. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii. Otsenka iskhodnoy seysmichnosti rayona i ploshchadki razmeshcheniya ob'yekta ispol'zovaniya atomnoy energii pri inzhenernykh izyskaniyakh i issledovaniyakh* [Safety Guidelines for Atomic Energy Use. Initial Seismicity Assessment of a Nuclear Facility Siting Area During Engineering Surveys and Research]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2017.

10. *Trudy Radiyevogo instituta im. V. G. Khlopina. T. XI* [Proceedings of the Radium Institute named after V. G. Khlopin. Vol. XI]. Saint-Petersburg, 2006. 135 p.

11. Lukina N. V. *Nizhnekanskiy granitoidnyy massiv: noveyshiye i sovremennyye tektonicheskiye dvizheniya, morfologiya i kinematika aktivnykh razlomov i megatreshchin, sovremennoye pole napryazheniy. Vozmozhnosti bezopasnogo zakhroneniya VAO* [Nizhnekanskiy granitoid rock mass: recent and modern tectonic movements, morphology and kinematics of active faults and megacracks, modern stress field. Opportunities for safe HLW disposal]. *Issledovaniya granitoidov Nizhnekanskogo massiva dlya zakhroneniya RAO. Materialy KNTS* [Studying the granitoids of the Nizhnekanskiy rock mass for radioactive waste

disposal purposes. KNTS proceedings]. Saint-Petersburg, 1999. Pp. 49–59.

12. Kaftan V. I., Sidorov V. A., Ustinov A. V. Sravnitel'nyy analiz tochnosti lokal'nogo monitoringa dvizheniy i deformatsiy zemnoy poverkhnosti s ispol'zovaniyem global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem GPS i GLONASS [Comparative monitoring accuracy analysis for local of movements and deformations of the earth's surface using global navigation satellite systems GPS and GLONASS]. *Vulkanologiya i seysmologiya — Volcanology and Seismology*, 2017, no. 3, pp. 50–58. DOI: 10.7868/S020303061703004X.

13. Kaftan V. I. *Vremennoy analiz geoprostranstvennykh dannykh: Kinematicheskiye modeli* [Temporal Analysis of Geospatial Data: Kinematic Models]. Dr. techn. sci. diss. Moscow, MGUPS Publ., 2003. 285 p.

14. Kaftan V. I., Ustinov A. V. Povysheniye tochnosti lokal'nogo geodinamicheskogo monitoringa sredstvami global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem [Improving the Accuracy of Local Geodynamic Monitoring via the Application of Global Navigation Satellite Systems]. *Gornyy zhurnal — Mining Journal*, 2015, no. 10, pp. 32–38. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.06.

15. Yesikov N. P. *Sovremennyye dvizheniya zemnoy poverkhnosti s pozitsiy teorii deformatsii* [Modern movements of the earth's surface according to the deformation theory]. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch, 1991. 226 p.

16. Kaftan V. I., Gvishiani A. D., Morozov V. N., Tatarinov V. N. Metodika i rezul'taty opredeleniya

dvizheniy i deformatsiy zemnoy kory po dannym GNSS na geodinamicheskom poligone v rayone zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [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 — Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 83–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-15-1-83-94.

17. Kaftan V. I., Tatarinov V. N., Manevich A. I., Prusakov A. N., Kaftan A. V. Otsenka tochnosti GNSS-nablyudeniy na etalonnom bazise kak sredstvo proverki izmeritel'noy apparatury lokal'nogo geodinamicheskogo monitoringa [Accuracy of GNSS Observations Evaluated on a Standard Basis as a Mean Allowing to Check the Local Geodynamic Measuring Monitoring Equipment]. *Geodeziya i kartografiya — Geodesy and Cartography*, 2020, vol. 81, no. 7, pp. 37–46. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-37-46.

18. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I., Minayev V. A., Ustinov S. A., Shevchuk R. V. Geodinamicheskaya model' severnoy chasti Nizhnekanskogo massiva: razlomnaya tektonika, deformatsii, izolyatsionnyye svoystva porod [Geodynamic Model Representing the Northern Part of the Nizhnekanskiy Rock Mass: Fault Tectonics, Deformations, Containment Properties of Rocks]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle — Doklady Earth Sciences*, 2022, vol. 507, no. 1, pp. 67–74.

Information about authors

Tatarinov Viktor Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Geodynamics Laboratory, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia); Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (10, build. 1, B. Gruzinskaya st., Moscow, 123242, Russia), e-mail: v.tatatrinov@gcras.ru.

Kaftan Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia), e-mail: v.kaftan@gcras.ru.

Manevich Alexander Ilyich, Researcher at the Geodynamics Laboratory, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia); National Research Technological University “MISIS” (4, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, Russia), e-mail: ai.manevich@yandex.ru.

Shevchuk Roman Vasilyevich, Junior Researcher at the Geodynamics Laboratory, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia); Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (10, build. 1, B. Gruzinskaya st., Moscow, 123242, Russia); National Research Technological University “MISIS” (4, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, Russia), e-mail: shevchuk.002@mail.ru.

Zabrodin Sergey Mikhailovich, Chief Specialist, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia), e-mail: zsm@yandex.ru.

Bibliographic description

Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I., Shevchuk R. V., Zabrodin S. M. Underground research facility: findings from 12-year GNSS observations of modern crust movements. *Radioactive Waste*, 2022, no. 4 (21), pp. 58–69. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-58-69. (In Russian).