## Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижне-Канском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов

В.И. Кафтан<sup>1,2</sup>, А.Д. Гвишиани<sup>1,3</sup>, В. Н. Морозов<sup>1</sup>, В. Н. Татаринов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Россия E-mail: v.kaftan@gcras.ru <sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, 117198, Россия <sup>3</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия

Рассмотрены методика и результаты определения современных движений и деформаций земной коры средствами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на геодинамическом полигоне в районе пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Красноярском крае. Подходы к наблюдениям и обработке данных направлены на получение наиболее точных результатов деформационного мониторинга. Методика повторных наблюдений обеспечивает ослабление односторонне действующих ошибок сезонного и местного характера за счёт организации работ в одно и то же время года и использования на каждом пункте во всех повторениях одного и того же комплекта измерительной аппаратуры. Применяются приёмы повышения объективности интерпретации результатов. Методика обработки измерений представляет собой уравнивание разностей разновременных приращений координат векторов базовых линий с учётом их ковариационных матриц. Итогом обработки являются векторы пространственных смещений и горизонтальные деформации треугольников контрольной наблюдательной сети. Для определения деформаций выбираются треугольники триангуляции Делоне. Для устранения эффекта неравновеликости треугольников осуществляется их масштабирование путём отнесения к средней площади треугольника. Описаны новые результаты определения деформаций, накопленных в районе Нижне-Канского массива с 2012 по 2016 г. Величины деформаций порядка 10<sup>-5</sup> свидетельствуют о высокой подвижности тектонических разломов исследуемой территории.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, геодинамический полигон, мониторинг, деформации, захоронение радиоактивных отходов

Одобрена к печати: 06.12.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94

### Введение

Главное требование к участку захоронения высокоактивных радиоактивных отходов заключается в сохранности изоляционных свойств геологической среды на весь период их радиобиологической опасности. Район должен быть тектонически стабильным, а деформации верхней части земной коры минимальны. Выбор таких участков основан на анализе скоростей современных движений земной коры (СДЗК), получаемых по данным геодинамического мониторинга. Наиболее современным и эффективным средством такого мониторинга сегодня являются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). Таким образом, в настоящей работе оценка влияния сформулированного выше требования к участку захоронения проводится путём его изучения на основе средств космического мониторинга.

В районе проектирования и строительства первого в России пункта захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (Нижне-Канский массив, Красноярский край) был создан специальный геодинамический полигон (ГДП). Он обеспечивает контроль СДЗК и деформаций земной поверхности на участке хранилища и окружающей его территории. На ГДП с 2010 г. проводятся регулярные ГНСС-измерения. В данной статье описываются методологические и технологические аспекты проведения геодинамических наблюдений и их результаты.

### Наблюдательная сеть, аппаратура и полевые работы

Наблюдательная сеть ГДП включает в себя 30 капитальных пунктов наблюдений (*puc. 1*), установленных на участке с размерами в широтном направлении до 35 км, а в меридиональном — около 15 км. Структура сети ГДП представлена на *puc. 2*. Геодинамический полигон практически охватывает все крупные тектонические нарушения в районе, а также пересекает границу Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы (Татаринов и др., 2015, 2016, 2017; Tatarinov et al., 2017). Пункты ГНСС-наблюдений представляют собой надёжно закреплённые устройства, конструкция которых отвечает существующим нормативными требованиями и обеспечивает надёжность установки на них ГНСС-антенн и приёмников. Схема конструкций пунктов наблюдений описана в работах (Андерсон и др., 2011; Татаринов, 2006; Татаринов и др., 2016).



Рис. 1. Внешний вид одного из пунктов геодинамической сети



*Рис. 2.* Схема геодинамического полигона. Чёрные прямые линии — проекции базовых линий ГНСС на картографическую основу; красные пунктирные линии — основные тектонические разломы

Для обеспечения высокой точности геодинамического мониторинга в наблюдениях используются двухчастотные и преимущественно двухсистемные ГНСС-приёмники геодезического класса, регистрирующие сигналы одновременно двух навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Сегодня такая конфигурация ГНСС-аппаратуры обеспечивает получение точностей определения горизонтальных и вертикальных смещений на уровне первых миллиметров (Кафтан и др., 2017).

Наблюдения на пунктах ГДП выполнялись в интервале времени 2010–2016 гг. в формате полевых компаний, проводимых с частотой до двух раз в год. При этом применялись разностные измерения в режиме «статика». Продолжительность сеанса одновременных наблюдений составляла от 4 до 12 ч.

В каждом цикле наблюдений используется несколько расстановок ГНСС-приёмников, образующих фрагменты единой сети, имеющие взаимные перекрытия. Это обусловлено количеством комплектов ГНСС-аппаратуры, участвующей в наблюдениях, и одновременно способствует достижению более высокой точности измерений (Кафтан, Устинов, 2015). В данном случае для наблюдений было задействовано 12 комплектов ГНСС-приёмников. Для ослабления влияния временных задержек в ГНСС-аппаратуре в каждом цикле наблюдений на конкретный пункт устанавливается один и тот же комплект «приёмник—антенна», что также способствует существенному уменьшению ошибок положения фазовых центров антенн ГНСС-приёмников (Kaftan, Tatevian, 2000).

Определение смещений и деформаций земной поверхности осуществляется математической обработкой временных разностей измерений текущего и начального циклов, как показано ниже.

### Уравнивание разностей спутниковых измерений

При обработке повторных ГНСС-измерений на ГДП нами предлагается и используется методика разностного уравнивания кинематической спутниковой геодезической сети, создание которой было начато ранее (Кафтан, 2003; Кафтан и др., 2010). При этом разностный метод уравнивания повторных классических (не спутниковых) геодезических измерений был применён существенно раньше другими авторами (Геодезические..., 1985; Герасименко, Шароглазова, 1985; Кафтан, 1986).

Известно, что раздельное уравнивание циклов повторных измерений в кинематических геодезических сетях менее эффективно, чем уравнивание разностей повторных наблюдений с целью определения векторов пространственных смещений геодезических пунктов (Геодезические..., 1985). Это обусловлено значительным однообразием физических условий измерений в каждом из циклов, которое при обработке разностей наблюдений обеспечивает получение более эффективных оценок.

Несмотря на то, что сегодня источники ошибок ГНСС-измерений достаточно хорошо изучены и методы их ослабления обеспечивают субсантиметровую точность, эффекты высоких порядков пока ещё вносят соответствующие возмущения на уровне нескольких миллиметров. К таковым относятся суточные и полусуточные колебания координат амплитудой до 0,5 см в горизонтальной плоскости и до 1 см по высоте (Устинов, Кафтан, 2016). Таким колебаниям подвергнуты ионосфера, тропосфера и генераторы частот радиосигнала спутников. Лунносолнечные приливы имеют в своих спектрах суточные и полусуточные гармоники. Подобная цикличность характерна также и для переотражений спутникового радиосигнала от объектов, окружающих пункт ГНСС. Совокупность указанных эффектов исследована, например, в работе (Hefty, Igondova, 2010). Сезонные изменения внешней среды также снижают точность координатных определений. Совпадение периодов колебаний у столь разнообразных внешних воздействий существенно осложняет разработку точных методик учёта систематических влияний и формул вычисления поправок в измеренные значения. Выполнение повторных ГНСС-измерений в один и тот же сезон и одно и то же время суток обеспечивает не полное исключение, но ослабление соответствующих квазипериодических влияний в разностях повторных измерений.

С использованием большинства коммерческих программных пакетов обработки спутниковых геодезических измерений получаются векторы базовых линий (трёхмерные векторы приращений пространственных координат между смежными пунктами) сети x' и их ковариационные матрицы  $Q_{x'}$ . Здесь индекс-штрих означает измеренное значение вектора, а также номер (в данном случае первый) цикла повторных измерений в сети из *n* пунктов. При этом в качестве случайных величин рассматриваются случайные ошибки определения трёх пространственных компонент векторов базовых линий.

Рассмотрим случайный вектор x' как вектор наблюдений размерностью 3n, где n — число базовых линий. Координатами случайного вектора являются измеренные пространственные компоненты базовых линий (X', Y', Z'). Тогда ковариационная матрица случайного вектора x' определяется следующей формулой:

$$x' = \begin{pmatrix} X_{1}' \\ Y_{1}' \\ Z_{1}' \\ \vdots \\ X_{n}' \\ Y_{n}' \\ Z_{n}' \end{pmatrix}, \quad Q_{x'} = \begin{pmatrix} q'_{XX_{1}} & q'_{XY_{1}} & q'_{XZ_{1}} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ q'_{XY_{1}} & q'_{YY_{1}} & q'_{ZY_{1}} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ q'_{XZ_{1}} & q'_{ZY_{1}} & q'_{ZZ_{1}} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & q'_{XX_{n}} & q'_{XY_{n}} & q'_{XZ_{n}} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & q'_{XY_{n}} & q'_{YZ_{n}} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & q'_{XZ_{n}} & q'_{YZ_{n}} & q'_{ZZ_{n}} \end{pmatrix}.$$
(1)

Аналогично для второго цикла измерений:

$$x'' = \begin{pmatrix} X_1'' \\ Y_1'' \\ Z'' \\ \vdots \\ X'' \\ Y_n'' \\ Z''_n \end{pmatrix}, \quad Q_{x''} = \begin{pmatrix} q_{XX_1}' & q_{XY_1}' & q_{XZ_1}' & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ q_{XY_1}' & q_{YY_1}' & q_{ZY_1}'' & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ q_{XZ_1}' & q_{ZY_1}'' & q_{ZZ_1}'' & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & q_{XX_n}'' & q_{XY_n}'' & q_{XZ_n}'' \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & q_{XX_n}'' & q_{YZ_n}'' & q_{ZZ_n}'' \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & q_{XZ_n}'' & q_{ZZ_n}'' \\ \end{pmatrix}.$$
(2)

Размерность векторов x' и x'' равна 3n, а их ковариационных матриц — $3n \times 3n$ . Отметим, что ковариационные матрицы являются блочно-диагональными, имеющими ненулевые диагональные подматрицы размерностью  $3 \times 3$ .

Вычислим вектор разностей повторных наблюдений x'' - x' (см. формулы (1) и (2)). Процедуру получения ковариационной матрицы вектора разностей компонент базовых линий рассмотрим на примере одной базовой линии (трёхмерного пространственного вектора, соединяющего точки наблюдений). В последующем изложении вектор разностей векторов базовых линий принимаем в качестве свободного члена уравнений поправок и обозначаем как l = x'' - x'.

Ковариационная матрица разностей векторов базовой линии получается почленным суммированием одноимённых элементов ковариационных матриц векторов первого и второго цикла измерений, поэтому ковариационная матрица разностей для всей сети равна сумме ковариационных матриц первого и второго циклов (1) и (2), т.е.:

$$Q_l = Q_{x'} + Q_{x''}.$$
 (3)

Далее приступаем к уравниванию разностей повторных спутниковых наблюдений и определяем векторы пространственных смещений *dx* с оценкой их точности:

$$dx = -\left(A^{T}Q_{l}^{-1}A\right)^{-1}A^{T}Q_{l}^{-1}l = -Q_{dx}^{-1}L.$$
(4)

В данном выражении матрица коэффициентов уравнений поправок имеет простой вид, зависящий от схемы спутниковой геодезической сети, и состоит из единиц и нулей. Число её строк равно утроенному числу 3m базовых линий, а число столбцов — утроенному числу 3n пунктов контрольной сети. Строка каждой компоненты базовой линии содержит 1 для элемента с номером *j* пункта, на который направлен пространственный вектор, и -1 для элемента с номером пункта *i*, с которого определяется направление вектора базовой линии. Так, например, для уравнений поправок вектора базовой линии с первого пункта на третий соответствующая матрица будет выглядеть следующим образом:

$$A_{1-2} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Из аналогичных подматриц для каждой из базовых линий составляется полная матрица уравнений поправок.

Получив решение (4), вычисляем средние квадратические ошибки векторов смещений:

$$m_{dx} = \mu \sqrt{\mathrm{diag}Q_{dx}},$$

где  $\mu$  — средняя квадратическая ошибка единицы веса, diag $Q_{dx}$  — диагональ матрицы  $Q_{dx}$ .

На этом этап уравнивания спутниковых измерений завершается, и приступают к дифференциальному описанию пространственных деформаций, как показано ниже.

#### Деформационный анализ

Одним из методов геолого-геофизической интерпретации результатов повторных ГНСС-наблюдений является метод дифференциального описания деформаций в механике сплошных сред, именуемый методом конечных элементов. В данном методе характеристиками описания изменений ограниченных участков земной поверхности являются деформации этих участков. Метод подробно описан в работе (Геодезические..., 1985) и широко применяется для описания изменений площади земной поверхности, контролируемых геодезическими сетями ГДП.

Методы определения деформаций в пределах конечных элементов пространственных геодезических сетей разработаны и описаны, например, в работах (Есиков, 1979, 1991). На сегодняшний день наиболее эффективным представляется раздельный анализ плановых и вертикальных деформаций по результатам повторных спутниковых наблюдений. Для этой цели используется следующая методика.

Полученные из уравнивания разностей измерений векторы пространственных смещений пунктов контрольных сетей преобразуются в разности геодезических координат  $\Delta B$ ,  $\Delta L$  и  $\Delta H$ . Для этой цели используем следующие дифференциальные формулы:

$$\begin{cases} \Delta B = \frac{1}{M+H} (-\Delta X \sin B \cdot \cos L - \Delta Y \sin B \cdot \sin L + \Delta Z \cos B), \\ \Delta L = \frac{1}{(N+H)\cos B} (-\Delta X \sin L + \Delta Y \cos L), \\ \Delta H = \Delta X \cos B \cdot \cos L + \Delta Y \cos B \cdot \sin L + \Delta Z \sin B, \end{cases}$$
(5)

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

где a — большая полуось;  $e^2$  — квадрат эксцентриситета общеземного эллипсоида. Ввиду малости значений исследуемых смещений по сравнению с размерами конечных элементов разности геодезических широт и долгот можно для удобства последующего анализа представить в линейном виде плоских координат x и y. Тогда соответствующие формулы примут вид:

$$\begin{cases} \Delta x = -\Delta X \sin B \cdot \cos L - \Delta Y \sin B \cdot \sin L + \Delta Z \cos B, \\ \Delta y = -\Delta X \sin L + \Delta Y \cos L. \end{cases}$$
(6)

В дальнейшем изложении мы не будем касаться деформационного анализа высотных компонент, так как он не требует специальной модернизации и может быть применён к спутниковым пространственным сетям в его существующем на сегодняшний день виде. Для последующей оценки точности искомых деформационных характеристик получим ковариационную матрицу плоских векторов смещений пунктов:

$$Q_{dx} = f_{dx} Q_{dX} f_{dx}^T, \tag{7}$$

где  $Q_{dx}$  — ковариационная матрица пространственных компонент смещений, полученная из уравнивания разностей спутниковых измерений (4), а  $f_{dx}$  — матрица частных производных функций плоских смещений (6) от соответствующих пространственных трёхмерных аргументов  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ . Матрица частных производных будет определена как:

$$f_{dX} = \begin{vmatrix} -\sin B_1 \cos L_1 & -\sin B_1 \sin L_1 & \cos B_1 \\ -\sin L_1 & \cos L_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\sin B_n \cos L_n & -\sin B_n \sin L_n & \cos B_n \\ -\sin L_n & \cos L_n & 0 \end{vmatrix},$$
(8)

где индекс коэффициентов является порядковым номером пункта контрольной сети.

Теперь, имея значения компонент двумерных плоских векторов смещений (6), получим формулы описания деформаций в пределах конечных элементов контрольной сети (треугольников).

Для каждого треугольника в плоской прямоугольной системе координат имеем значения координат его вершин *x*, *y* и разностей координат (горизонтальных смещений)  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , полученных из уравнивания повторных спутниковых измерений. Тогда плановые деформации  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\Delta$  и  $\omega$  вычисляем по формулам О. М. Остача (Геодезические..., 1985):

$$\gamma_{1} = \frac{x_{2}(\Delta y_{3} - \Delta y_{1}) + y_{2}(\Delta x_{3} - \Delta x_{1}) - x_{3}(\Delta y_{2} - \Delta y_{1}) - y_{3}(\Delta x_{2} - \Delta x_{1})}{x_{2}y_{3} - x_{3}y_{2}};$$

$$\gamma_{2} = \frac{x_{2}(\Delta x_{3} - \Delta x_{1}) + y_{2}(\Delta y_{3} - \Delta y_{1}) - x_{3}(\Delta x_{2} - \Delta x_{1}) - y_{3}(\Delta y_{2} - \Delta y_{1})}{x_{2}y_{3} - x_{3}y_{2}};$$

$$\Delta = \frac{x_{2}(\Delta y_{3} - \Delta y_{1}) - y_{2}(\Delta x_{3} - \Delta x_{1}) - x_{3}(\Delta y_{2} - \Delta y_{1}) + y_{3}(\Delta x_{2} - \Delta x_{1})}{x_{2}y_{3} - x_{3}y_{2}};$$

$$\omega = \frac{-x_{2}(\Delta x_{3} - \Delta x_{1}) - y_{2}(\Delta y_{3} - \Delta y_{1}) + x_{3}(\Delta x_{2} - \Delta x_{1}) + y_{3}(\Delta y_{2} - \Delta y_{1})}{2(x_{2}y_{3} - x_{3}y_{2})}.$$
(9)

Деформации максимального и минимального растяжения получаем по формулам:

$$E_{1} = \frac{1}{2} \left[ \Delta + \sqrt{\gamma_{1}^{2} + \gamma_{2}^{2}} \right], \quad E_{2} = \frac{1}{2} \left[ \Delta - \sqrt{\gamma_{1}^{2} + \gamma_{2}^{2}} \right], \tag{10}$$

а азимут главной оси деформаций определяется выражением:

$$tg2\theta_0 = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}.$$
 (11)

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

$$Q_{(\gamma_1,\gamma_2,\Delta,\omega)} = f_{(\gamma_1,\gamma_2,\Delta,\omega)} Q_{dx} f^T_{(\gamma_1,\gamma_2,\Delta,\omega)},$$
(12)

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:

$$f_{(\gamma_1,\gamma_2,\Delta,\omega)} = \frac{1}{x_2y_3 - x_3y_2} \begin{pmatrix} -y_2 + y_3 & x_2 - x_3 & -y_3 & -x_3 & y_2 & x_2 \\ -x_2 + x_3 & y_2 - y_3 & -x_3 & -y_3 & x_2 & -y_2 \\ y_2 - y_3 & -x_2 + x_3 & y_3 & -x_3 & -y_2 & x_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & x_3 & y_3 & -x_2 & -y_3 \end{pmatrix}$$

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

Далее определяем средние квадратические ошибки компонент деформаций по формуле:

$$m_{(\gamma_1,\gamma_2,\Delta,\omega)} = \mu_{\sqrt{\text{diag}Q_{(\gamma_1,\gamma_2,\Delta,\omega)}}}.$$
(13)

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

# Результаты определения деформаций земной поверхности в пределах ГДП

Представленная методика используется авторами при обработке данных наблюдений, системном анализе и интерпретации результатов мониторинга на ГДП в районе захоронения радиоактивных отходов (Гвишиани, Татаринов, 2015; Гвишиани и др., 2008, 2018а; Татаринов и др., 2016; Tatarinov et al., 2017) в Красноярском крае. Следует отметить, что ГНСС-наблюдения осуществляются одновременно по двум системам ГЛОНАСС и GPS. Показано, что точность наблюдений при доведении группировки ГЛОНАСС до сегодняшнего состава GPS может повыситься в полтора раза (Кафтан и др., 2017).

На *рис. 3* (см. с. 90) приведён основной результат настоящей работы — вычисленные накопленные значения главных растяжений/сжатий, а также дилатация (скорость деформаций) за период наблюдений на ГДП с 2012 по 2016 г.

Заметим, что деформации земной поверхности в пределах конечного элемента (треугольника) сети обратно пропорциональны его площади. Это осложняет интерпретацию пространственного распределения деформаций в неоднородной контрольной сети. При равных смещениях пунктов в неравновеликих треугольниках деформации будут не одинаковы, что может интерпретироваться как пространственная неоднородность геодинамического 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.

Полученные результаты показывают, что в пределах контрольной сети есть области с повышенными значениями растяжений/сжатий, достигающими  $10^{-5}$  в южной части ГДП (Татаринов и др., 2015, 2016). Этот участок охватывает зону захоронения радиоактивных отходов, поэтому результаты наблюдений на ГДП должны привлечь внимание при обосновании геоэкологической безопасности захоронения радиоактивных отходов в данном районе (Гвишиани и др., 20186; Татаринов и др., 2016). В дальнейшем необходимо также разработать методические подходы к учёту масштабных пространственно-временных эффектов при геолого-геофизической интерпретации данных наблюдений на ГДП (Татаринов, 2006; Татаринов, 2012).



Рис. 3. Деформации главных растяжений/сжатий (красные пунктиры — растяжения, синие линии — сжатия) и дилатации (чёрные изолинии) в пределах исследуемой территории за 2012–2016 гг. Сечение изолиний 0,5×10<sup>-5</sup>. Средние квадратические ошибки определения деформаций не превышают 10<sup>-6</sup>. Аномальные неоднородности, выраженные сгущением изолиний дилатации и осями главных растяжений/сжатий, достигающих 10<sup>-5</sup>, расположены в южной части контрольной сети

Результаты мониторинга будут положены в основу задания граничных условий моделирования напряжённо-деформированного состояния горных пород, обнаружения зон опасных деформаций для подземного комплекса от техногенно-природных воздействий (Кузьмин, 2002а, б).

### Обсуждение результатов

Мониторинг современных движений и деформаций земной коры в районах захоронения высокоактивных радиоактивных отходов является важнейшей фундаментальной научной задачей в проблеме обеспечения геоэкологической безопасности подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов в геологических формациях. Для её решения необходимо обеспечить высокую точность, объективность и эффективность деформационного мониторинга.

Для этого разработан и применяется описанный выше оригинальный метод уравнивания спутниковых измерений. Также используется технология мониторинга на локальных геодинамических полигонах (Кафтан, Устинов, 2015), обеспечивающая повышение точности ГНСС-наблюдений, анализа и интерпретации данных.

Обнаружена деформационная неоднородность в пределах контрольной сети ГНСС (см. *puc. 2*), требующая совершенствования методики и создания программы специальных наблюдений за движениями и деформациями земной коры в обнаруженных аномальных зонах, а также методологии геофизической интерпретации данных наблюдений. В частности, необходимо развёртывание в аномальных зонах более плотной и регулярной сети с большей частотой повторных измерений. Специальная программа наблюдений в этой зоне особенно важна, так как она расположена вблизи проектируемого захоронения радиоактивных отходов.

Кроме того, должны продолжаться наблюдения в масштабах всего ГДП как минимум в течение пяти лет для выявления устойчивого тренда скоростей СДЗК и определения зон, опасных для сохранности изоляционных свойств породного массива деформаций. При этом необходимо обращать внимание на концентрацию напряжений в других местах ГДП, где также потребуется совершенствование программы наблюдений. Работа выполняется в рамках проекта Российского научного фонда № 18-17-00241 «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов».

## Литература

- 1. 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 кн., 2011. 592 с.
- 2. *Гвишиани А.Д., Татаринов В. Н.* Геологическая среда и проблема обеспечения безопасности подземной изоляции РАО // Горный журн. 2015. № 10. С. 4–5.
- 3. *Гвишиани А.Д., Белов С.В., Агаян С.М., Родкин М.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Богоутдинов Ш.Р.* Методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология. 2008. № 2. С. 3–14.
- 4. *Гвишиани А.Д., Татаринов В. Н., Морозов В. Н.* (2018а) Системная оценка факторов, определяющих устойчивость геологической среды при захоронении высокоактивных радиоактивных отходов // 10-я Международная конф. «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий». 6–8 авг. 2018, Алматы, Казахстан. Курчатов: НЯЦ РК, 2018. С. 105–106.
- 5. *Гвишиани А.Д., Вайсберг Л.А., Татаринов В. Н., Маневич А. И.* (2018б) Системный анализ в горных науках и уменьшении природного ущерба // Материалы Международной конф., посвященной памяти академика А. В. Кряжимского, «Системный анализ: моделирование и управление». М.: Мат. ин-т им. В. А. Стеклова РАН, 2018. С. 43–45.
- 6. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах: метод. рук. М.: ЦНИИГАиК, 1985. 113 с.
- 7. *Герасименко М.Д., Шароглазова Г.А.* Определение современных движений земной коры из повторных измерений // Геодезия и картография. 1985. № 7. С. 25–29.
- 8. *Есиков Н. П.* Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности // Труды Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР. 1979. Вып. 426. 182 с.
- 9. *Есиков Н. П.* Современные движения земной поверхности с позиций теории деформации. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. 226 с.
- 10. *Кафтан В. И.* Анализ устойчивости геодезических пунктов и определение векторов смещений земной коры // Геодезия и картография. 1986. № 5. С. 9–13.
- 11. *Кафтан В. И.* Временной анализ геопространственных данных: Кинематические модели: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГУПС, 2003. 285 с.
- 12. *Кафтан В. И., Устинов А. В.* Повышение точности локального геодинамического мониторинга средствами глобальных навигационных спутниковых систем // Горный журн. 2015. № 12. С. 32–37.
- 13. *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.
- 14. *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.
- 15. *Кузьмин Ю. О.* (2002а) Современная аномальная геодинамика асейсмичных разломных зон // Электронный научно-информ. журн. «Вестн. Отделения наук о Земле РАН». 2002. № 1(20). С. 1–27.
- Кузьмин Ю. О. (2002б) Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная малыми природно-техногенными воздействиями // Горный информационно-аналит. бюл. М.: МГГУ, 2002. № 9. С. 48–55.
- 17. *Татаринов В. Н.* Геодинамическая безопасность на объектах ядерного топливного цикла // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2006. № 1(85). С. 46–51.
- 18. *Татаринов В. Н., Татаринова Т. А.* Учет масштабного эффекта при наблюдениях за деформациями земной поверхности спутниковыми навигационными системами // Маркшейдерский вестн. 2012. № 5. С. 15–19.
- 19. *Татаринов В. Н., Бугаев Е. Г., Татаринова Т.А.* К оценке деформаций земной поверхности по данным спутниковых наблюдений // Горный журн. 2015. № 10. С. 27–32. DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.10.05.

- 20. *Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Сеелев И. Н.* Изучение современной геодинамики Нижне-Канского массива для безопасного захоронения радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2016. Т. 121. № 3. С. 157–160.
- 21. *Устинов А. В., Кафтан В. И.* Суточные и полусуточные колебания в результатах локального мониторинга с использованием глобальных навигационных спутниковых систем // Изв. Всерос. научно-исслед. ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2016. Т. 282. С. 3–13.
- 22. *Hefty J., Igondova M.* Diurnal and semi-diurnal coordinate variations observed in EUREF permanent GPS network a case study for period from 2004.0 to 2006.9 // Contribution to Geophysics and Geodesy. 2010. V. 40. No. 3. P. 225–247.
- Kaftan V.I., Tatevian R.A. Local control network of the fiducial GLONASS/GPS station // IAG. Section I — Positioning, Comission X — Global and Regional Networks, Subcommission for Europe (EUREF). Publication No. 9. Munchen, 2000. P. 333–337. URL: http://www.euref.eu/symposia/ book2000/P\_333\_37.pdf.
- 24. *Tatarinov V., Kaftan V., Tatarinova T., Manevich A.* Modern Geodynamics of South Yenisei Ridge to Result of the GPS/GLONASS Observations // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. 95 032024. DOI: doi.org/10.1088/1755-1315/95/3/032024.

## 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

V. I. Kaftan<sup>1,2</sup>, A. D. Gvishiani<sup>1,3</sup>, V. N. Morozov<sup>1</sup>, V. N. Tatarinov<sup>1,3</sup>

 <sup>1</sup> Geophysical Center RAS, Moscow 119926 Russia
 <sup>2</sup> Peoples' Friendship University of Russia, Moscow 117198, Russia
 <sup>3</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia E-mail: v.kaftan@gcras.ru

The methods and results of determining the current movements and deformations of the Earth's crust by means of global navigation satellite systems (GNSS) at a geodynamic test site in the area of deep burial of radioactive waste in Krasnoyarskiy Kray are considered. Approaches to observations and data processing are aimed at obtaining the most accurate results of deformation monitoring. The method of repeated observations ensures the weakening of one-directional measurement errors of a seasonal and local nature due to the organization of work at one and the same time of the year, and using at each point the same set of measuring equipment in all repetitions. Techniques to improve the objectivity of the interpretation of results are applied. The measurement processing technique is an adjustment of the differences of the time-varying increments of the coordinates of the baseline vectors with regard to their covariance matrices. The result of processing is the vectors of spatial displacements and horizontal deformations of the triangles of the control observation network. To determine the deformations, the triangles of Delaunay triangulation are selected. To eliminate the effect of triangles unequality, they are scaled by assigning them to the average area of the triangle. New results of the determination of deformations accumulated in the region of the Nizhnekanskiy Massif from 2012 to 2016 are described. The magnitude of the deformations of the order of  $10^{-5}$  indicate a high mobility of tectonic faults of the studied territory.

Keywords: global navigation satellite system, geodynamic test area, monitoring, deformation, radioactive waste disposal

Accepted: 06.12.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94

### References

- 1. Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N., Kolesnikov I. Yu., Lobanov N. F., Morozov V. N., Tatarinov V. N., *Podzemnaya izolyatsiya radioaktivnykh otkhodov* (Underground isolation of radioactive waste), Moscow: Gornaya kniga, 2011, 592 p.
- 2. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Geologicheskaya sreda i problema obespecheniya bezopasnosti podzemnoi izolyatsii RAO (Geological environment and the problem of ensuring the safety of underground isolation of radioactive waste), *Gornyi zhurnal*, 2015, No. 10, pp. 4–5.
- Gvishiani A. D., Belov S. V., Agayan S. M., Rodkin M. V., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Bogoutdinov Sh. R., Metody iskusstvennogo intellekta pri otsenke tektonicheskoi stabil'nosti Nizhnekanskogo massiva (Methods of artificial intelligence in assessing the tectonic stability of the Nizhnekansky massif), *Inzhenernaya ekologiya*, 2008, No. 2, pp. 3–14.
- 4. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Morozov V. N. (2018a), Sistemnaya otsenka faktorov, opredelyayushchikh ustoichivost' geologicheskoi sredy pri zakhoronenii vysokoaktivnykh radioaktivnykh otkhodov (Systemic assessment of factors determining the stability of the geological environment during the disposal of high-level radioactive waste), *10-ya mezhdunarodnaya konferentsiya "Monitoring yadernykh ispytanii i ikh po-sledstvii*" (10<sup>th</sup> Intern. Conf. "Monitoring of nuclear tests and their effects"), Book of Abstracts, Almaty, Kazakhstan, Kurchatov: NYaTs RK, 2018, pp. 105–106.
- Gvishiani A. D., Vaisberg L. A., Tatarinov V. N., Manevich A. I. (2018b), Sistemnyi analiz v gornykh naukakh i umen'shenii prirodnogo ushcherba (Systems analysis in mining sciences and natural damage reduction), *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika A. V. Kryazhimskogo "Sistemnyi analiz: modelirovanie i upravlenie"* (Proc. Intern. Conf. Devoted to the Memory for Academician A. V. Kriazhimsky "System Analysis: Modeling and Management"), Moscow: Matematicheskii institut im. V. A. Steklova RAN, 2018, pp. 43–45.
- 6. *Geodezicheskie metody izucheniya deformatsii zemnoi kory na geodinamicheskikh poligonakh: Metod. ruk.* (Geodesic methods for studying the deformations of the earth's crust at geodynamic polygons: Methodological guide), Moscow: TsNIIGAiK, 1985, 113 p.
- 7. Gerasimenko M. D., Sharoglazova G. A., Opredelenie sovremennykh dvizhenii zemnoi kory iz povtornykh izmerenii (Determination of recent crustal movements from repeated measurements), *Geodeziya i karto-grafiya*, 1985, No. 7, pp. 25–29.
- 8. Esikov N. P., Tektonofizicheskie aspekty analiza sovremennykh dvizhenii zemnoi poverkhnosti (Tectonophysical aspects of the analysis of resent movements of the earth's surface), *Trudy Instituta geologii i geofiziki SO AN SSSR*, 1979, Issue 426, 182 p.
- 9. Esikov N. P., *Sovremennye dvizheniya zemnoi poverkhnosti s pozitsii teorii deformatsii* (Recent movements of the earth's surface from the standpoint of the theory of deformation), Novosibirsk: Nauka, Sib. otdelenie, 1991, 226 p.
- Kaftan V. I., Analiz ustoichivosti geodezicheskikh punktov i opredelenie vektorov smeshchenii zemnoi kory (Analysis of the stability of geodetic points and the determination of the displacement vectors of the earth's crust), *Geodeziya i kartografiya*, 1986, No. 5, pp. 9–13.
- 11. Kaftan V. I., *Vremennoi analiz geoprostranstvennykh dannykh: Kinematicheskie modeli: Dis. dokt. tekhn. nauk* (Temporal analysis of geospatial data: Kinematic models, Dr. techn. sci. thesis), Moscow: MGUPS, 2003, 285 p.
- 12. Kaftan V. I., Ustinov A. V., Povyshenie tochnosti lokal'nogo geodinamicheskogo monitoringa sredstvami global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem (Improving the accuracy of local geodynamic monitoring by means of global navigation satellite systems), *Gornyi zhurnal*, 2015, No. 12, pp. 32–37.
- 13. Kaftan V. I., Krasnoperov R. I., Yurovskii P. P., Graficheskoe predstavlenie rezul'tatov opredeleniya dvizhenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti sredstvami global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh system (Graphical representation of the results of determining the movements and deformations of the Earth's surface by means of global navigation satellite systems), *Geodeziya i kartografiya*, 2010, No. 11, pp. 2–7.
- Kaftan V. I., Sidorov V.A., Ustinov A. V., A Comparative Analysis of the Accuracy Attainable for the Local Monitoring of Earth's Surface Movements and Deformation Using the GPS and GLONASS Navigation Satellite Systems, *J. Volcanology and Seismology*, 2017, Vol. 11, No. 3, pp. 217–224, DOI: 10.1134/ S0742046317030034.
- 15. Kuzmin Yu.O. (2002a), Sovremennaya anomal'naya geodinamika aseismichnykh razlomnykh zon (Modern anomalous geodynamics of aseismic fault zones), *Elektronnyi nauchno-informatsionnyi zhurnal "Vestnik Otdeleniya Nauk o Zemle RAN"*, 2002, No. 1(20), pp. 1–27.
- 16. Kuzmin Yu. O. (2002b), Sovremennaya anomal'naya geodinamika nedr, indutsirovannaya malymi prirodno-tekhnogennymi vozdeistviyami (Recent anomalous geodynamics of the Earth interior, induced by small

natural and man-made effects), *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*', Moscow: MGGU, 2002, No. 9, pp. 48–55.

- 17. Tatarinov V. N., Geodinamicheskaya bezopasnost' na ob"ektakh yadernogo toplivnogo tsikla (Geodynamic safety at nuclear fuel cycle facilities), *Ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii*, 2006, No. 1(85), pp. 46–51.
- Tatarinov V. N., Tatarinova T. A., Uchet masshtabnogo effekta pri nablyudeniyakh za deformatsiyami zemnoi poverkhnosti sputnikovymi navigatsionnymi sistemami (Consideration of the scale effect when observing deformations of the Earth's surface by satellite navigation systems), *Marksheiderskii vestnik*, 2012, No. 5, pp. 15–19.
- 19. Tatarinov V. N., Bugaev E. G., Tatarinova T. A., K otsenke deformatsii zemnoi poverkhnosti po dannym sputnikovykh nablyudenii (Estimation of Earth Surface Deformations Based on Satellite Observations), *Gornyi zhurnal*, 2015, No. 10, pp. 27–32, DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.10.05.
- Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Seelev I. N., Izuchenie sovremennoi geodinamiki Nizhne-Kanskogo massiva dlya bezopasnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov (Study of the modern geodynamics of the Nizhnekanskiy Massif for safe burial of radioactive waste), *Atomnaya energiya*, 2016, Vol. 121, No. 3, pp. 157–160.
- 21. Ustinov A. V., Kaftan V. I., Sutochnye i polusutochnye kolebaniya v rezul'tatakh lokal'nogo monitoringa s ispol'zovaniem global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem (Diurnal and semi-diurnal fluctuations as the result of local monitoring using global navigation satellite systems), *Izvestiya Vserosiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva*, 2016, Vol. 282, pp. 3–13.
- 22. Hefty J., Igondova M., Diurnal and semi-diurnal coordinate variations observed in EUREF permanent GPS network a case study for period from 2004.0 to 2006.9, *Contribution to Geophysics and Geodesy*, 2010, Vol. 40, No. 3, pp. 225–247.
- 23. Kaftan V.I., Tatevian R.A., Local control network of the fiducial GLONASS/GPS station, *IAG*, *Section I Positioning*, *Comission X Global and Regional Networks*, *Subcommission for Europe (EUREF)*, Publication No. 9, Munchen, 2000, pp. 333–337, URL: http://www.euref.eu/symposia/book2000/P\_333\_337.pdf.
- 24. Tatarinov V., Kaftan V., Tatarinova T., Manevich A., Modern Geodynamics of South Yenisei Ridge to Result of the GPS/GLONASS Observations, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 95 032024, DOI: doi.org/10.1088/1755-1315/95/3/032024.