ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 493, № 1, с. 73–77

УДК 551.242.1

# СКОРОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ

© 2020 г. Академик РАН А. Д. Гвишиани<sup>1,2</sup>, В. Н. Татаринов<sup>1,2</sup>, В. И. Кафтан<sup>1</sup>, А. И. Маневич<sup>1,3,\*</sup>, Б. А. Дзебоев<sup>1</sup>, И. В. Лосев<sup>1,3</sup>

Поступило 30.04.2020 г. После доработки 03.05.2020 г. Принято к публикации 05.05.2020 г.

Представлены результаты ГНСС-измерений, проведенных авторами в 2010–2019 гг. в зоне контакта тектонических структур Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Западно-Саянской орогенной области. Впервые представлена оценка средних скоростей современных горизонтальных движений и построена структурно-кинематическая модель блоковых движений в южной части Енисейского кряжа. Эта модель дает возможность оценить геодинамическую безопасность захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в гранитогнейсовых породах Нижне-Канского массива.

*Ключевые слова:* современные горизонтальные движения земной коры, Сибирская платформа, Западно-Сибирская плита, Нижне-Канский массив, ГНСС-наблюдения, радиоактивные отходы **DOI:** 10.31857/S2686739720070075

Южная часть Енисейского кряжа находится в зоне сочленения крупных региональных тектонических структур: древней Сибирской платформы, эпигерцинской Западно-Сибирской плиты и Западно-Саянской орогенной складчатой области [1]. В пределах Нижне-Канского гранитогнейсового массива, непосредственно граничащего с Атамановским отрогом Енисейского кряжа, в 2019 г. начато строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) для обоснования безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) [2].

В 2010 г. сотрудниками Горно-химического комбината (г. Железногорск) и Геофизического центра РАН в пределах Нижне-Канского массива была создана спутниковая геодезическая сеть, состоящая из 30 пунктов ГНСС-наблюдений за современными движениями земной коры (СДЗК) [3]. На этих пунктах было проведено семь циклов измерений. Выполнен анализ временных рядов изменения координат ГНСС-пунктов за период с 2010 по 2019 гг.

<sup>1</sup>Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия Для определения векторов смещений и скоростей деформаций использованы методические подходы и алгоритмы, описанные в работах [4, 5]. Основой для обработки данных ГНСС-измерений и их интерпретации стали векторы базовых линий и их корреляционные матрицы, полученные в результате статической обработки и диагностического уравнивания циклов измерений с 2010 по 2019 гг. Были получены временные ряды смещений для 23 геодезических пунктов. В табл. 1 приведены впервые рассчитанные скорости смещений ГНСС-пунктов, представленных на рис. 1. Средние квадратические ошибки (СКО) определения их положения в плане для отдельных эпох измерений не превышали 3–3.5 мм [5].

При проектировании геодинамического полигона была использована структурно-тектоническая схема района [6], согласно которой поле СДЗК определяется силовым взаимодействием крупнейших тектонических структур — Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы (рис. 1), контактирующих по Муратовскому разлому, и подчиненных им разломов, в основном субмеридионального простирания [7].

Карта скоростей СДЗК была проанализирована в совокупности с данными высокоточного нивелирования 1-класса [8] и геологических исследований [9]. На рис. 2 показано поле среднегодовых скоростей горизонтальных СДЗК и результат их кинематической интерпретации. Район делит-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Горный институт НИТУ "МИСиС", Москва, Россия

<sup>\*</sup>E-mail: a.manevich@gcras.ru

#### ГВИШИАНИ и др.

Код ГНСС- пункта	Интервал измерений, годы	Средняя скорость $v_e$ , мм/год	Средняя скорость <i>v<sub>n</sub></i> , мм/год	СКО о <sub>е</sub> , мм	СКО σ <sub><i>n</i></sub> , мм
1205	2012-2019	-0.15	-1.42	0.90	1.05
1206	2012-2019	0.05	0.96	0.81	0.99
1214	2012-2019	-1.49	-0.26	0.95	1.17
1215	2012-2019	-0.53	-0.23	0.99	1.28
1216	2012-2019	-0.02	1.35	0.96	1.19
LP04	2012-2019	-1.56	-0.91	0.80	1.00
LP05	2012-2019	0.01	-0.93	0.97	1.20
LP06	2012-2019	-0.22	-1.13	1.25	1.58
LP07	2012-2019	1.15	2.35	0.89	1.10
OPO2	2012-2019	-0.80	0.21	0.84	1.06
OPO3	2012-2019	0.65	-0.11	1.05	1.30
1209	2014-2019	1.18	0.53	0.84	0.59
1219	2014-2019	-0.27	-1.92	0.71	0.50
1401	2014-2019	0.13	1.73	0.82	0.58
1201	2012-2016	0.17	-0.32	1.09	1.35
1202	2012-2016	0.41	2.37	0.66	0.80
1204	2012-2016	-3.83	0.21	0.46	0.56
1207	2012-2016	0.79	1.33	0.63	0.88
1211	2012-2016	0.71	-2.87	1.54	2.10
1212	2012-2016	0.85	-1.38	1.28	1.56
1213	2012-2016	-2.15	-0.36	0.59	0.72
LP08	2012-2016	1.02	-1.11	0.49	0.63
LP09	2012-2016	3.68	1.23	0.48	0.63

**Таблица 1.** Скорости горизонтальных СДЗК в направлении восток  $v_e$  и север  $v_n$  за 2012—2019 гг. и СКО их определения  $\sigma_e$  и  $\sigma_n$ 

ся на 13 крупных структурных блока, границами которых в большинстве случаев служат выделенные ранее геологическими методами крупные тектонические разломы [6, 10].

Скорости горизонтальных СДЗК (табл. 1) свидетельствуют о современной тектонической активности Муратовского, Атамановского, Канско-Атамановского, Правобережного и Шумихинского разломов (рис. 1, 2). На территории Западно-Сибирской плиты распределение скоростей движений достаточно однородно. Выделено 3 блока, с максимальными скоростями ~2–3 мм/год (рис. 2).

Движения в центральной и северной части зоны контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы (структурные блоки IV и V) меняют направления с субширотного на субмеридиональное, что свидетельствует о сдвиговом характере движений по Муратовскому и Атамановскому разломам (рис. 2). Этот участок является наиболее подвижным в районе. 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.

В крыльях Правобережного разлома блоковые сдвиговые движения создают "уступовидную" структуру. При этом по контакту блоков VII и IX получены максимальные градиенты горизонтальных СДЗК. Смена направлений горизонтальных движений с субширотного на субмеридиональное совпадает с Шумихинским разломом, который непосредственно пересекает участок строительства ПИЛ (на рис. 2 он показан прямо-



Рис. 1. Структурно-тектоническая схема и современные горизонтальные движения 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. Цифрами на рис. 1 и рис. 2 обозначены основные тектонические разломы: 1 – Первый Красноярский разлом; 2 – Муратовский разлом; 3 – Атамановский разлом; 4 – Канско-Атамановский разлом; 5 – Малотельский разлом; 6 – Правобережный разлом; 7 – Большетельский разлом; 8 – Шумихинский разлом; 9 – Байкальский разлом. Место строительства ПИЛ показано прямоугольником.



**Рис. 2.** 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. Латинскими цифрами обозначены тектонические блоки, выделенные по данным ГНСС-наблюдений.

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ том 493 № 1 2020

угольником). Этот структурный блок находится на расстоянии 2–3 км от зоны контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты и, безусловно, испытывает его влияние.

Полученная модель хорошо согласуется с результатами структурно-геологических и геодинамических исследований в данном районе [6-8, 10]. Скорость сближения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты в зоне взаимодействия южной части Енисейского кряжа можно оценить величиной 2-4 мм/год. При этом 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. Сибирская платформа оказалась поднятой до абсолютных отметок ~700-800 м, а Западно-Сибирская плита – относительно опущенной, на 120-200 м [7]. Атамановский хребет воздымается, что подтверждает унаследованный характер движений, по крайней мере, с четвертичного периода [7]. В результате этого, блок VII движется на запад, а блок XIII- на восток.

Также был установлен циклический характер развития геодинамических движений в районе геодинамического полигона [3]. В 2013–2014 гг. была зафиксирована активизация геодинамического режима, проявившаяся в смене знака деформаций сжатия и растяжения на западном и восточном берегах р. Енисей.

В целом, для региона можно заключить, что движения обусловлены субширотным сжатием по азимуту ~ $100^{\circ}-110^{\circ}$ . Внутри выделенных тектонических блоков получены относительно невысокие скорости современных горизонтальных движений земной коры, что подтверждает стабильный геодинамический режим структурного блока, вмещающего ПИЛ. Тем самым результаты работы демонстрируют возможность захоронения высокоактивных РАО в выбранном структурном блоке.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовалось оборудование и материалы, предоставленные ЦКП "Аналитический центр геомагнитных данных" Геофизического центра РАН (http://ckp.gcras.ru/).

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Верниковская А.Е. и др. Неопротерозойская тектоническая структура Енисейского кряжа и формирование западной окраины Сибирского кратона на основе новых геологических, палеомагнитных и геохронологических данных // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 63–90. https://doi.org/10.15372/GiG20160104
- 2. Лаверов Н.П., Величкин В.И., Кочкин Б.Т. Мальковский В.И., Петров В.А., Пэк А.А. Концепция оценки безопасности хранилищ отработавших ядерных материалов, размещаемых в кристаллических породах // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010. № 3. С. 195–206.
- 3. 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. https://doi.org/10.21455/gr2018.4-5
- Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татаринов В.Н., Вавилин Е.В. Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // Физика Земли. 2019. № 1. С. 42–60. https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60
- 5. 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 геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса. 2019. № 1. С. 83–94. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-83-94
- Лобацкая Р.М. Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 2005.Т. 46. № 2. С. 141–150.
- Белов С.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Камнев Е.Н., Хаммер Й. Изучение строения и геодинамической эволюции Нижнеканского массива в связи с захоронением высокоактивных радиоактивных отходов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 3. С. 248–266.
- 8. *Колмогорова П.П., Колмогоров В.Г.* Современные вертикальные движения земной коры Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 4. С. 455–466.
- 9. 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. https://doi.org/10.25283/2587-9707-2019-4-46-62
- 10. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736. https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314

# THE VELOCITIES OF MODERN HORIZONTAL MOVEMENTS OF EARTH CRUST IN THE SOUTH SECTOR OF YENISEI RIDGE ACCORDING TO GNSS OBSERVATIONS

Academician of the RAS A. D. Gvishiani<sup>*a,b*</sup>, V. N. Tatarinov<sup>*a,b*</sup>, V. I. Kaftan<sup>*a*</sup>, A. I. Manevich<sup>*a,c,#*</sup>, B. A. Dzeboev<sup>*a*</sup>, and I. V. Losev<sup>*a,c*</sup>

<sup>a</sup> Geophysical Center of the, Moscow, Russian Federation <sup>b</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation <sup>c</sup> Mining Institute NUST "MISiS", Moscow, Russian Federation <sup>#</sup>E-mail: a.manevich@gcras.ru

The paper presents the results of GNSS observations, provided by the authors in 2010–2019 years, in the zone of contact of tectonic structures of the Siberian platform, West-Siberian plate and West-Sayan orogenic area. We presented the first time assessment of the velocities of modern horizontal movements and the structural-kinematic model of block movements in a southern sector of the Yenisei Ridge. This model enables to assess the geodynamic safety of disposal of high-level radioactive waste in granitogneiss rocks of the Nizhne-Kansk massif.

*Keywords:* modern horizontal movements of Earth crust, Siberian platform, West-Siberian Plate, Nizhne-Kansk massif, GNSS observations, radioactive waste