

УДК 551.242.1

СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2018 г. В.Н. Татаринов^{1,2}, В.Н. Морозов¹, А.И. Кафтан¹, А.И. Маневич¹

¹ *Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия*

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

Представлены результаты изучения современных движений земной коры в северной части Нижне-Канского массива (Красноярский край), где планируется строительство первого в России пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в геологических формациях. Проведенные в 2010–2016 гг. наблюдения на основе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС позволили получить новые знания о современном геодинамическом режиме района, расположенного в зоне контакта крупнейших тектонических структур – Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Саянского орогена. Инструментально доказан циклический характер современных геодинамических движений. Установлено, что в 2013–2014 гг. произошла резкая активизация тектонического режима территории, проявившаяся сменой знака деформаций сжатия и растяжения в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты на право- и левобережье р. Енисей.

Максимальные скорости движений были зафиксированы для пунктов, находящихся в зоне динамического влияния Муратовского и Правобережного разломов. С увеличением времени наблюдений за счет эффекта цикличности происходит снижение абсолютных значений скоростей движений. Так, за шестилетний период наблюдений они лишь в редких случаях превышали величину ± 5 мм/год. Сравнивая величины скоростей деформаций с опубликованными критериями выделения опасных разломов, можно утверждать, что район достаточно стабилен в геодинамическом плане – максимальные скорости деформаций в нем не превышают $5 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹.

Ключевые слова: современные движения земной коры, спутниковые системы GPS/ГЛОНАСС, мониторинг, радиоактивные отходы.

Введение

Одна из проблем, сдерживающих развитие ядерной энергетики в России, – отсутствие эффективной и безопасной технологии удаления из биосферы высокоактивных долгоживущих радиоактивных отходов. На современном научно-техническом уровне эта проблема может быть решена единственным практически осуществимым способом – захоронением отходов в глубоких геологических формациях.

В конце девятых годов прошлого столетия в России были начаты исследования по выбору места для создания первого пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов; в 2018 г. строительство такого пункта началось в гранито-гнейсовых породах Нижне-Канского массива в Красноярском крае.

Нижне-Канский массив расположен в зоне активного орогенеза, т.е. его формирование как горного сооружения еще не завершено. Известно, что долгоживущие радиоактивные отходы представляют для биосферы опасность в течение более 10 тыс. лет, и, следовательно, геодинамические условия в районе их захоронения на момент начала строительства пункта захоронения не могут служить гарантией сохранности естественных изоляционных свойств геологической среды на весь срок эксплуатации пункта. За столь длительный период тектонические движения могут кардинально изменить уро-

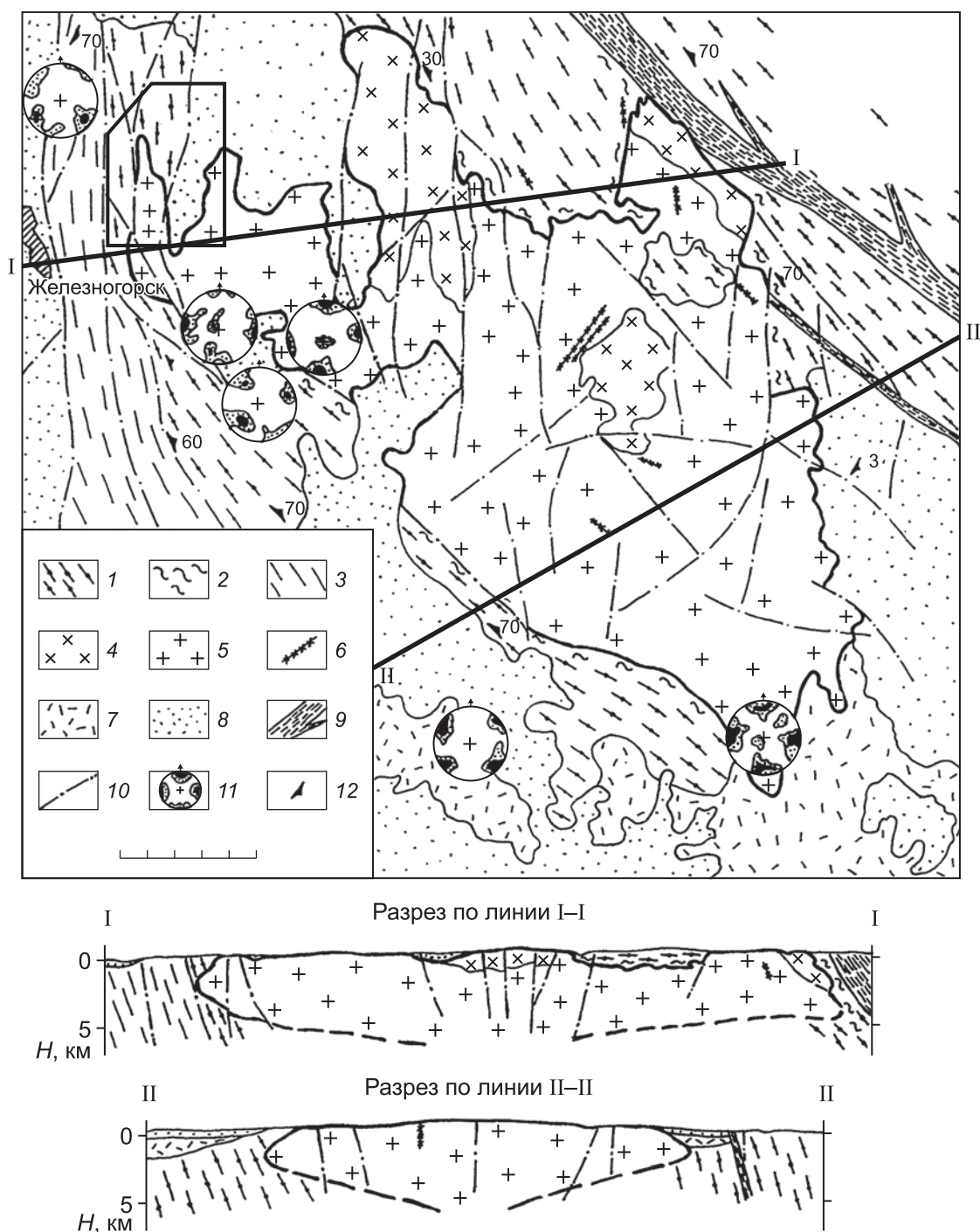
вень подземных вод, привести к образованию новых каналов инфильтрации флюидов и раскрытию уже существующих, а также и к другим негативным явлениям. Наибольшую геозекологическую угрозу представляет тектоническая деструкция структурно-тектонических блоков, находящихся во внешнем поле нелинейно изменяющихся во времени напряжений. В процессе тектонической эволюции этих блоков внутри них вероятно образование новых тектонических разломов или активизация “пассивных”, что может привести к проникновению подземных вод в подземные выработки пункта захоронения и выносу радионуклидов в окружающую среду. По этой причине фундаментальное значение приобретает задача изучения современных движений земной коры и прогнозирование максимально возможных скоростей деформаций и напряжений в породных массивах, вмещающих подземные выработки пунктов захоронения радиоактивных отходов.

В 2010 г. в пределах Нижне-Канского массива был создан геодинамический полигон для инструментальных наблюдений за современными движениями земной коры на основе глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. В настоящей статье представлены обобщенные результаты наблюдений за шесть лет, которые касаются не только чисто прикладных аспектов, относящихся к геозекологической безопасности, но и расширяют наши знания о современном геодинамическом режиме территории, находящейся на границе крупнейших тектонических структур – Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянского орогена.

Геолого-тектоническое положение района исследований

Нижне-Канский массив расположен в южной части Енисейского кряжа в сложнейшем узле сочленения трех крупных вышеназванных тектонических структур, силовое взаимодействие которых определяет современное напряженное состояние массива. Он образован гранитным интрузивным телом, вытянутым на 60 км с юго-востока на северо-запад при ширине около 30 км (рис. 1). Мощность интрузии варьирует от 5 до 8 км; возраст оценивается по разным данным от 450 до 800 млн. лет. Разрывные нарушения имеют, как правило, субширотную и субмеридиональную направленность, причем последние считаются более молодыми. Несмотря на сложность геологического строения и современного рельефа, район исследований в течение очень длительного периода характеризовался стабильным тектоническим режимом, амплитуда его поднятия за неоген-четвертичный период оценивается в 400–500 м, а средняя скорость поднятия по геологическим данным составила 0.2–0.3 мм/год. Река Енисей делит район на две зоны – левобережную с преимущественно отрицательными вертикальными движениями и правобережную с положительными. Крупными тектоническими нарушениями в районе являются субмеридиональные разломы Муратовский, Атамановский, Правобережный и Большетельский [Белов и др., 2007]. В соответствии с генеральным направлением этих тектонических нарушений при планировании структуры геодинамической сети была выбрана схема размещения пунктов наблюдений по линии профиля, пересекающей названные разломы с запада на восток в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты [Татаринов и др., 2014].

На основе инженерно-геологических изысканий для строительства пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов был выбран участок “Енисейский”, восточный край которого отсекается древним, активированным на современном этапе Правобережным разломом, формирующим северо-восточный склон Атамановского хребта (см. рис. 2). Длина разлома составляет около 20 км; максимальная амплитуда возникшего в триасе–юре сброса оценивается в 400–580 м; амплитуда послееюрского смещения оценивается в среднем в 300 м.



Разлом был “подновлен” на новейшем этапе – он был активен в голоцене и, возможно, активен и в настоящее время. Ширина зоны динамического влияния Правобережного разлома изменяется от 300 м до 3 км. Перпендикулярно к нему расположен Шумихинский сдвиг, отделяющий пониженный неотектонический блок от центральной части участка. Таким образом, два разрывных нарушения делят участок на 3 разновысотных неотектонических блока. В четырех километрах к западу от границы участка находится современная граница между Сибирской платформой и Западно-Сибирской плитой – Муратовский разлом, являющийся зоной контакта, по которому плита опускается, а платформа медленно воздымается [Андерсон и др., 2011; Белов и др., 2007].

Рис. 1. Схема геологического строения Нижне-Канского массива: 1 – гнейсовый комплекс (AR); 2 – приконтактовая мигматизация; 3 – слюдяно-гнейсовый комплекс с амфиболитами, кварцитами и мраморами (AR–PR); 4, 5 – контуры гранитоидов НКМ: диориты и гранодиориты 1-й фазы (4), граниты и лейкограниты 2-й фазы (5); 6 – дайки кислого состава; 7 – терригенно-вулканогенные отложения (PZ₂); 8 – терригенные отложения (J); 9 – зоны милонитов; 10 – основные разломы, выделенные по геолого-геофизическим и структурно-геоморфологическим данным; 11 – круговые диаграммы ориентировки трещин; 12 – элементы залегания пород. Утолщенные линии I-I, II-II – профили, разрезы по которым приведены внизу

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Nizhne-Kansky massif: 1 is gneiss complex (AR); 2 is contact migmatization; 3 is mica-gneiss complex with amphibolites, quartzites, and marbles (AR – PR); 4 and 5 are NCM granitoids contour: diorites and granodiorites of the 1st phase (4) and granites and leucogranites of the 2nd phase (5); 6 are dikes of acidic composition; 7 are terrigenous-volcanic deposits (PZ₂); 8 are terrigenous deposits (J); 9 are zones of milonites; 10 are main faults identified from geological, geophysical, and structural geomorphological data; 11 are circular charts of crack orientation; 12 are elements of rock occurrences. Cross-sections below correspond to profiles I-I and II-II shown by bold lines



Результаты предыдущих инструментальных наблюдений

Среди работ по изучению вертикальных компонент современных движений в исследуемом регионе наиболее известны две – [Колмогорова, Колмогоров, 2002, 2004], согласно которым максимальные скорости вертикальных движений земной коры не превышают 2–6 мм/год. Высокоточное нивелирование, выполненное в период с 1938 по 1986 гг., позволило установить гипотетическую нулевую изолинию скоростей вертикальных движений, которая пересекает р. Енисей в районе пос. Белорусский и р. Кан в районе дер. Шивера. К югу от нулевой изолинии на расстоянии 100 км от нее зарегистрирована зона поднятий со скоростью 0.8–1.0 мм/год. К северу от нулевой изолинии на расстоянии 80–150 км зарегистрированы опускания со скоростью 0.6–2.5 мм/год.

С 1976 г. Красноярский проектно-изыскательский институт ВНИПИЭТ определял высоты пунктов по данным нивелирования III класса, в 1998, 1999, 2009 – II класса. Зафиксированы незначительные вертикальные смещения со средней скоростью 0.08–0.15 мм/год.

В 1989, 1990, 1991 гг. Алма-Атинский архитектурно-строительный институт провел три цикла наблюдений за вертикальными движениями по маршрутам, пересекающим Муратовский и Первый Красноярский разломы. Измерения выполнялись по программе I класса повышенной точности. Наибольшие расхождения между прямым и обратным ходом не превышали ± 0.7 мм на 1 км хода; длина профилей составляла от 1.0 до 3.0 км; количество реперов на профиле – от 4 до 5. По результатам этих измерений в 1991 г. было сделано заключение, что расхождение в превышениях между реперами лежит в пределах точности измерений, составляя не более 0.7–0.8 мм.

В 2002 г. все созданные ранее пункты прецизионных измерений были реконструированы и выполнены геодезические наблюдения. При длине нивелирного хода более 33 км были пересечены основные тектонические нарушения района – Муратовский, Первый Красноярский, Атамановский, Правобережный разломы. Нивелирование позволило оценить среднегодовые значения вертикальных смещений в 1.2 мм/год с точностью ± 0.5 мм на 1 км.

Таким образом, по данным инструментальных наблюдений, выполненных в разные годы, можно сделать два вывода. Первый – скорости вертикальных современных

движений земной коры в районе исследования не превышают 2.5 мм/год; установленный в разные периоды разброс скоростей составляет 0.08–2.5 мм/год, что, вероятно, связано с цикличностью развития геодинамических движений во времени и масштабным временным эффектом [Татаринов, Татаринова, 2012]. Отметим, что площадные инструментальные измерения горизонтальных компонент современных движений земной коры в исследуемом районе до 2010 г. не проводились.

Методика исследований

Первые наблюдения за геодинамическим режимом района с использованием глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС были начаты в 2005 г. в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований по обоснованию методики использования спутниковых навигационных систем [Татаринов, 2006]. В результате были построены региональные модели полей напряжений в Нижне-Канском массиве и на участке “Енисейский” (см. [Андерсон и др., 2011; Белов и др., 2007; Морозов, Колесников, Татаринов, 2011] и др.). Начиная с 2010 г., работы выполнялись уже на постоянной основе. Были проведены наблюдения на 10 пунктах в пределах участка “Енисейский” (эпоха 0), а затем в 2012–2016 гг. (эпохи 1–5) – на геодинамическом полигоне, включающем уже 30 пунктов наблюдений.

Измерения выполнялись по следующей схеме. На трех опорных пунктах в течение всего периода полевых работ запись велась постоянно, по остальным пунктам наблюдений последовательно перемещались шесть ГНСС приемников. Время записи сигналов на одном пункте составляло 8–12 часов. Порядок перемещения приемников между пунктами в каждую эпоху сохранялся максимально близким для всех эпох наблюдений – только за счет этого, как показали расчеты, средняя квадратическая ошибка определения горизонтальных и вертикальных компонент современных движений земной коры уменьшалась на 1.5–2 мм. Измерения проводились в режиме статики; маска угла отсечения – 15°, дискретность записи – 10 с. Для записи спутниковых сигналов использовались двухчастотные GPS/ГЛОНАСС приемники “Hiper” (6 шт.) с антеннами MarAnt+ и “Topcon GR-3” (6 шт.).

Обсуждение результатов наблюдений

Для определения векторов смещений и деформаций использовались подходы и алгоритмы, описанные в [Кафтан, 1986; Кафтан, Докукин, 2007]. Основой для кинематической обработки GPS-наблюдений служили векторы базовых линий и их корреляционные матрицы, полученные в результате статической обработки и диагностического уравнивания циклов измерений 2010–2016 гг. с использованием программного обеспечения *MAGNET Office Tools* [Татаринов и др., 2014].

Кинематическому уравниванию подвергались разности повторных измерений, полученные вычитанием векторов базовых линий предыдущей эпохи из последующих эпох наблюдений. Уравнивание выполнялось по методу наименьших квадратов, расширенному на неравноточные и зависимые измерения. Первичное уравнивание сети, образованной повторными измерениями, выполнялось как нуль-свободное, когда ни одно из значений смещений ее пунктов не принималось за исходное (опорное).

Результаты уравнивания показали, что пункты западной части сети (№№ 1201, 1202, 1212 и 1213) образуют группу взаимноустойчивых пунктов, не изменяющих свое взаимоположение в пределах среднеквадратичной ошибки их определений. При даль-

нейшей обработке эти пункты использовались в качестве условно устойчивых, и получение векторов смещений остальных пунктов сети осуществлялось по отношению к этой группе, центр тяжести смещения которой считался неподвижным. При этом сами пункты группы получали значения собственных смещений так же, как и все остальные пункты сети. Так как эпох наблюдения было всего шесть, то при визуализации и интерпретации данных использовался не традиционный подход, когда для каждого пункта строятся временные ряды смещений и вектора с эллипсами ошибок, а проводилось сравнение изменения длин базовых линий между пунктами (ΔL).

Считается, что определение величин L точнее, чем определение координат пунктов [Кафтан, 1986; Татаринов, 2006], поэтому вначале анализировались абсолютные значения и скорости изменения длин линий между пунктами наблюдений для эпох 2012–2016 гг. Для этого выполнялось свободное уравнивание сети GPS наблюдений, при котором не использовались опорные значения координат. На поправки в неизвестные координаты накладывалось условие минимума суммы их квадратов – $[\delta X^2] = \min$. В результате были получены уравненные компоненты векторов базовых линий и рассчитаны значения среднеквадратических ошибок (рис. 2).

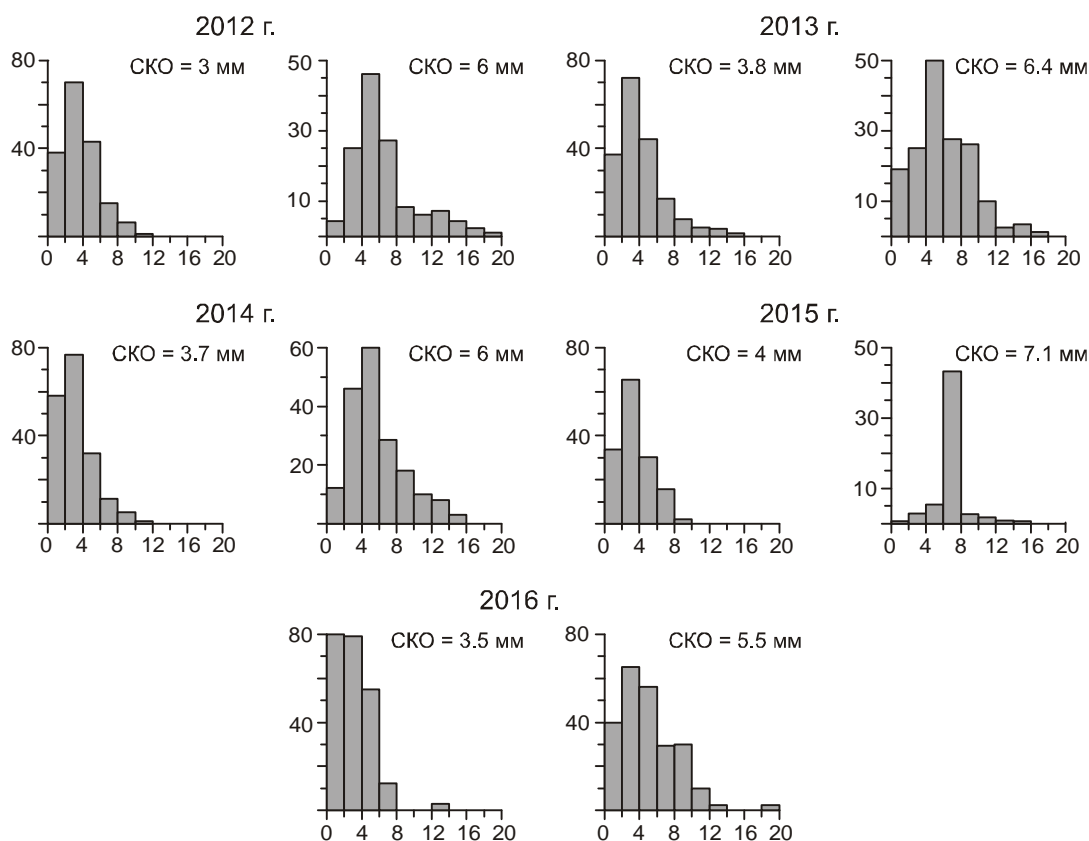


Рис. 2. Наблюдения 2012–2016 гг. Среднеквадратические ошибки (SKO) определения координат пунктов наблюдений для каждого года в плане (слева) и по высоте (справа)

Fig. 2. Standard errors of determining the coordinates of observation points (left) and their heights (right) for the observation period from 2012 to 2016

Можно видеть, что среднеквадратические ошибки определения положения пунктов в плане лежат в диапазоне 3–4 мм, по высоте – 5.5–7 мм. При таких значениях относительно высокие изменения длин линий, полученные в 2014 г., безусловно, связаны

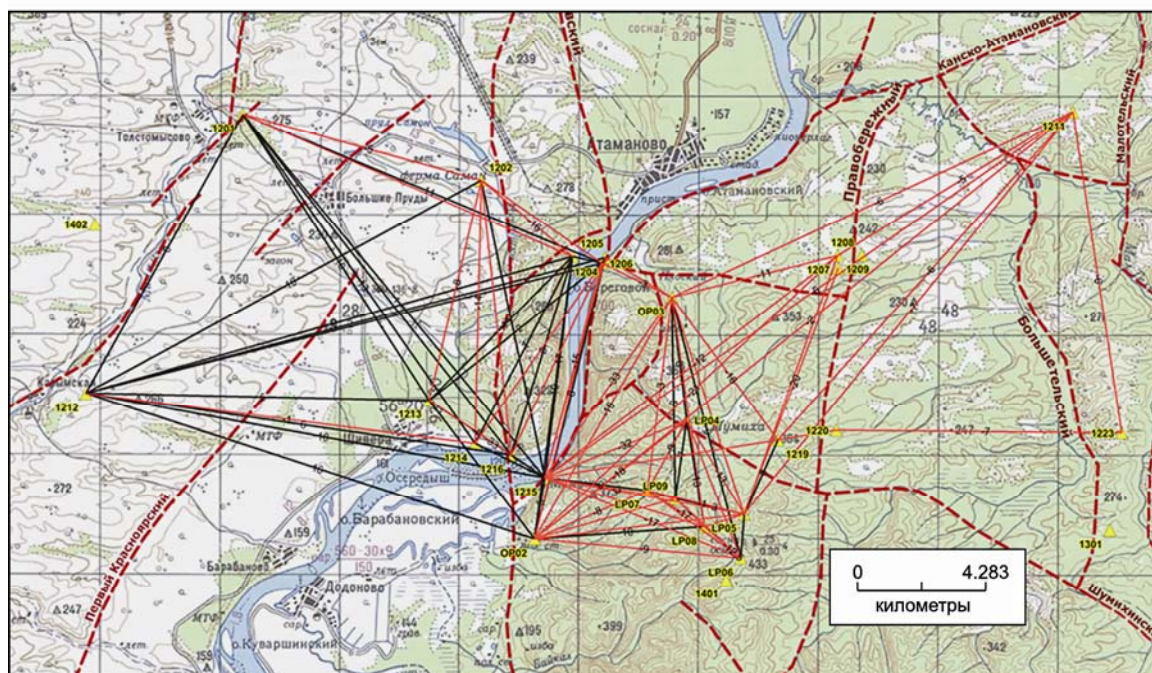
с природными факторами, а не с возможными ошибками наблюдений или обработки данных. Очевидно, что наиболее вероятной причиной изменения длин базисных линий является фундаментальное свойство – циклический характер развития геодинамических движений во времени, когда относительно длительные периоды затишья сменяются короткими периодами интенсивных подвижек по разломам (см., например, [Хаин, Халилов, 2009] и др.).

Цикличность развития геодинамических движений хорошо прослеживается на картах, приводимых на рис. 3, где черным цветом выделены линии, длина которых за указанный временной интервал не изменилась или увеличилась (растяжение), а красным – линии, длина которых уменьшилась (сжатие). Детальный анализ расположения базисных линий, для которых по итогам шестилетних наблюдений были получены максимальные скорости изменения базисов (удлинения или укорочения), позволил установить пространственно-временную закономерность в геодинамическом режиме территории.

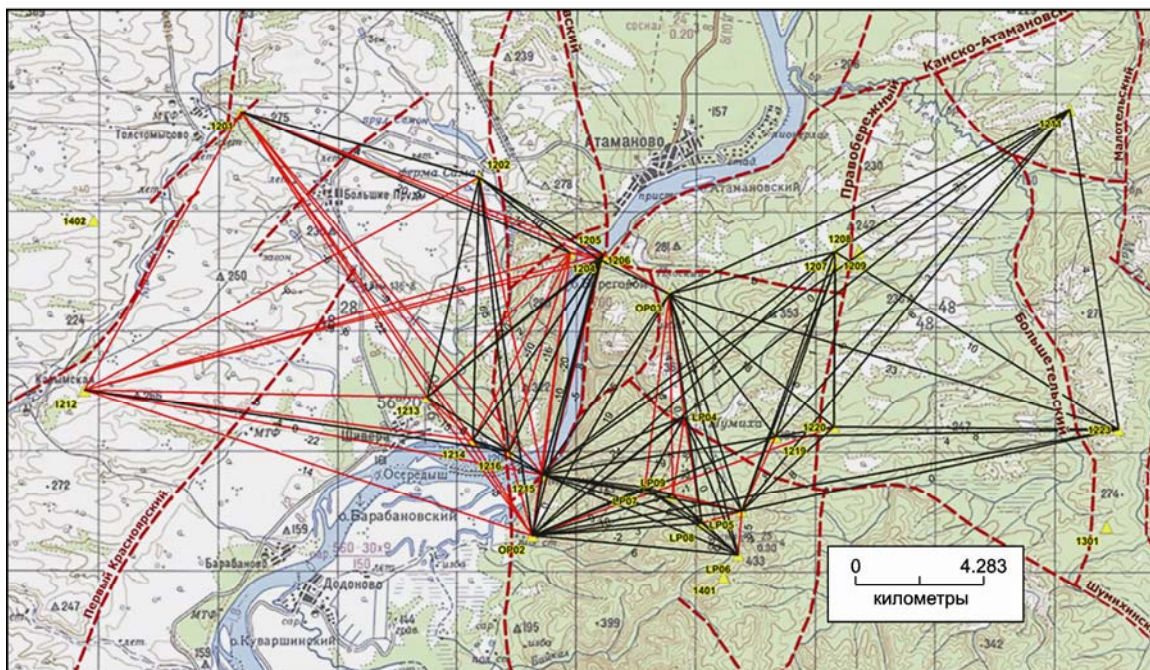
Период наблюдений можно разбить на три интервала: 2012–2013 гг., когда максимальные изменения длин не превышали 10 мм и в целом были существенно ниже; 2013–2014 гг., когда резко возросло количество базовых линий, для которых ΔL достигали 10–20 мм; 2015–2016 гг., когда начался переход к геодинамическому режиму, похожему на режим первого периода наблюдений.

В 2014 г. максимальные скорости были зафиксированы для линий, связанных с пунктами, которые расположены на берегу р. Енисей (№№ 1205, 1204, 1206, 1214, 1215, 1216, ОР02) и находятся в зоне динамического влияния Муратовского разлома, являющегося границей Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. Из приведенного на рис. 3 следует, что на всей правобережной части района длины базовых линий за период 2012–2013 гг. уменьшались, т.е. происходило относительное сжатие верхней части земной коры. На левобережной части, исследуемой территории, наоборот, почти все линии увеличились по длине, т.е. район испытывал растяжение. Затем в 2013–2014 гг. картина резко изменилась.

2012–2013 гг.



2013–2014 гг.



2014–2015 гг.

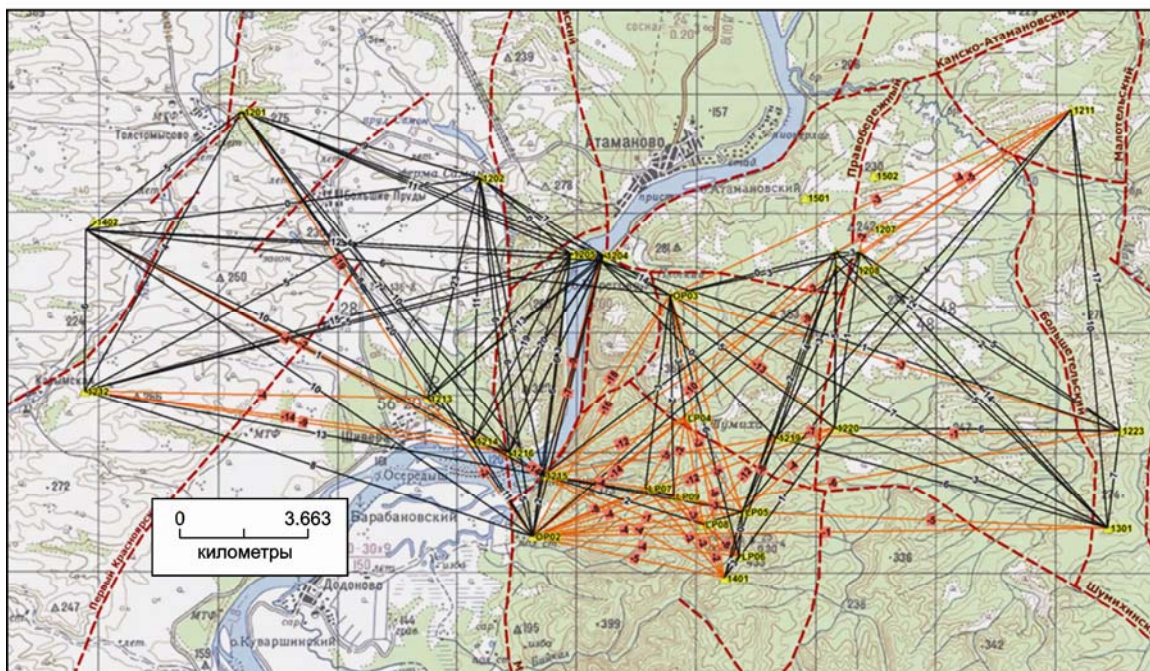


Рис. 3. Изменение длины базисных линий в последовательные временные периоды – 2012–2013, 2013–2014, 2014–2015 гг. Черным цветом выделены линии, длина которых в указанный период не изменилась или увеличилась (растяжение), красным – линии, длина которых уменьшилась (сжатие)

Fig. 3. Changes in baseline lengths for different time intervals: 2012–2013; 2013–2014; 2014–2015. Lines with constant or increased (extension) lengths are marked by black and lines with decreased lengths (compression), by red

На правом берегу р. Енисей почти все линии претерпели растяжение, на левом – сжатие. Вероятно, именно в этот период произошел очередной цикл активизации тектонического режима. Тектонические зоны, связанные с р. Енисей, активны в настоящее время и делят регион на две провинции, что подтверждается результатами и моделирования, и геоморфологического районирования района [Андерсон и др., 2011; Морозов, Колесников, Татаринов, 2011].

За счет эффекта цикличности большие ежегодные значения скоростей современных движений земной коры существенно уменьшаются при более длительных интервалах наблюдений, что является положительным фактом для сохранности изоляционных свойств пород при захоронении радиоактивных отходов, так как величина максимальных деформаций среды с увеличением интервала осреднения уменьшается. Это подтверждает приводимая на рис. 4 диаграмма распределения скоростей изменения ΔL , построенная для всего времени наблюдений. Можно видеть, что значения скорости изменения ΔL лежат в интервале от -6 до $+6$ мм/год, что в целом соответствует геодинамическому режиму платформенных территорий. Средняя скорость изменения ΔL составила 0.42 ± 0.29 мм/год. Это говорит о том, что в целом площадь района за время наблюдений испытала незначительное растяжение. Эффект зависимости скоростей изменения ΔL от интервала осреднения приведен в [Татаринов и др., 2014].

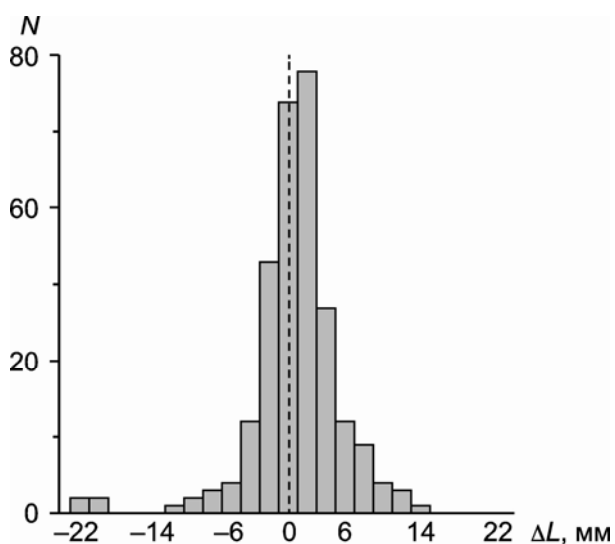


Рис. 4. Наблюдения 2010–2016 гг. Диаграмма распределения скоростей изменения длин линий ΔL между пунктами

Fig. 4. Distribution of velocities of changes in line lengths ΔL between points for the entire observation period from 2010 to 2016

Для прогноза устойчивости объектов с длительным сроком эксплуатации существенное значение имеют не собственно сами смещения, а скорости деформаций геологической среды [Татаринов, Татаринова, 2012; Татаринов, Бугаев, Татаринова, 2015]. Поэтому для периода 2012–2016 гг. была построена карта дилатации земной поверхности, рассчитываемой по формуле $\Delta = 0.5(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})$, где ϵ_{xx} – скорость деформаций в широтном направлении, ϵ_{yy} – в меридиональном (рис. 5).

На карте можно видеть, что максимальные значения дилатации зафиксированы на четырех участках, среди которых зона сжатия в зоне Атамановского разлома, являющегося контактным швом между Сибирской платформой и Западно-Сибирской плитой (пункты №№ 1204, 1205, 1206) – $\Delta = 5 \cdot 10^{-7}$ в год; зона растяжения на участке, расположенном на левом берегу р. Енисей (пункт № 1213) – $\Delta = -1.3 \cdot 10^{-7}$ в год; зоны сжатия и растяжения на участке “Енисейский” – $\Delta = 8 \cdot 10^{-8} \dots - 3 \cdot 10^{-8}$ в год; зона растяжения на правом берегу р. Енисей (пункты №№ 1207, 1208, 1209) – $\Delta = 7 \cdot 10^{-8}$ в год.

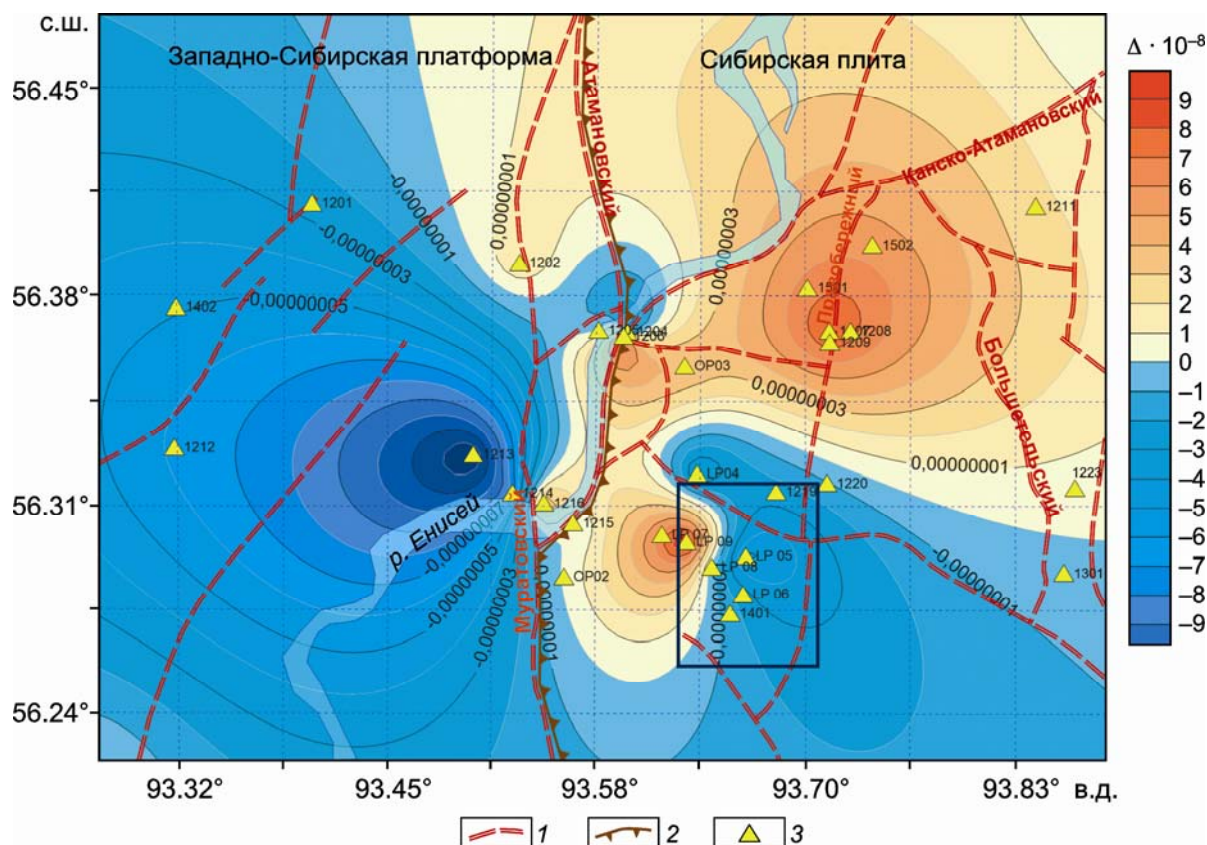


Рис. 5. Карта дилатации земной поверхности за 2012–2016 гг. 1 – основные тектонические разломы; 2 – граница между Западносибирской платформой и Сибирской плитой; 3 – пункты ГНСС наблюдений; прямоугольный контур – граница участка “Енисейский”

Fig. 5. Map of the Earth's dilatation for the period from 2012 to 2016. 1 are the main tectonic faults, 2 is the border between the West Siberian Platform and the Siberian Plate, 3 are points of GNSS observations, and the rectangle indicates the position of the “Yeniseiskii” area

Если в последнем случае (пункты №№ 1207, 1208, 1209) максимальные значения дилатации можно объяснить активностью Правобережного разлома, то для пункта № 1213, находящегося в относительно спокойном месте с идеальными условиями для наблюдений, отрицательную дилатацию можно объяснить силовым воздействием сдвига по Муратовскому разлому. Неблагоприятным для сохранности изоляционных свойств пород является то, что через участок “Енисейский” проходит линейная зона смены знака деформаций сжатия и растяжения.

В работе [Кузьмин, 1999] приведены значения скоростей относительных деформаций для участков повышенной геодинамической опасности, составляющие $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-5}$ в год. Сравнивая с этими значениями полученную дилатацию, можно утверждать, что практически вся исследуемая территория, включая и аномальные зоны, характеризуется достаточно умеренными деформациями, на два–три порядка отличающимися от критериев, приведенных в названной работе.

Оси главных деформаций сжатия и растяжения, построенные для ограниченных базовыми линиями треугольных конечных элементов, показаны на рис. 6 для наблюдений 2012–2016 гг.

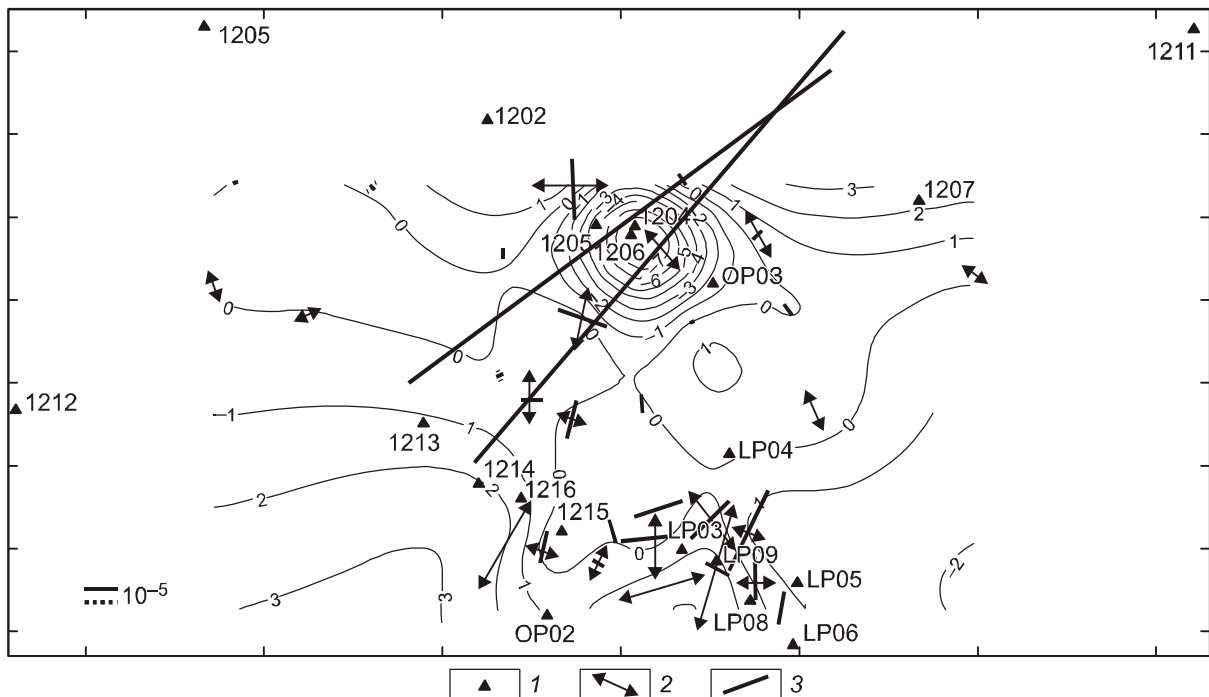


Рис. 6. Наблюдения 2012–2016 гг. Оси главных деформаций сжатия–растяжения на карте изолиний дилатации для всего периода наблюдений. 1 – пункты наблюдения; 2 – оси растяжения; 3 – оси сжатия. Значения изолиний – $\Delta \cdot 10^{-8}$ в год

Fig. 6. Axes of main compression (2) and tension (3) strains on the contour map of equal dilatations (in $\Delta \cdot 10^{-8}$ in year) for the observations in 2012–2016; 1 are observation points

Можно видеть, что максимальные деформации сжатия отмечены в зоне сдвига по Муратовскому разлому (пункты №№ 1204, 1205, 1206). Преобладающие направления действия главных напряжений для региона определяются тектоническими усилиями, ориентированными с северо-востока на юго-запад. Эту информацию необходимо использовать в моделях напряженно-деформированного состояния при проектировании расположения подземных выработок пунктов захоронения радиоактивных отходов.

Была предпринята попытка по изменениям абсолютных величин ΔL проследить директивные направления, связанные с действием главных тектонических усилий в районе, что очень важно при задании граничных условий в процессе моделирования напряженно-деформированного состояния пород. Для этого были построены диаграммы изменения длин линий для всего периода наблюдений 2012–2016 гг. и для отдельных эпох наблюдений (рис. 7).

Возможные азимуты максимальных изменений величин ΔL показаны стрелками на диаграмме для всего периода наблюдений (см. рис. 7, *внизу*). Интересно, что эти направления совпадают с направлениями простирания основных тектонических нарушений района. Следовательно, можно предположить, что деформации земной поверхности в большей степени связаны со сдвиговыми движениями по крупнейшим разломам. Из диаграмм на рис. 7 следует, что в эпоху 2012–2013 гг. были зафиксированы минимальные изменения длин, которые лежат в интервале от 0 до 10 мм, т.е. геодинамический режим территории за время наблюдений был самым спокойным. В целом, названные значения незначительно превышают среднеквадратическую ошибку (3.8–4.0 мм). Фактически все линии группируются вокруг центра, какие-либо четко выраженные направления отсутствуют.

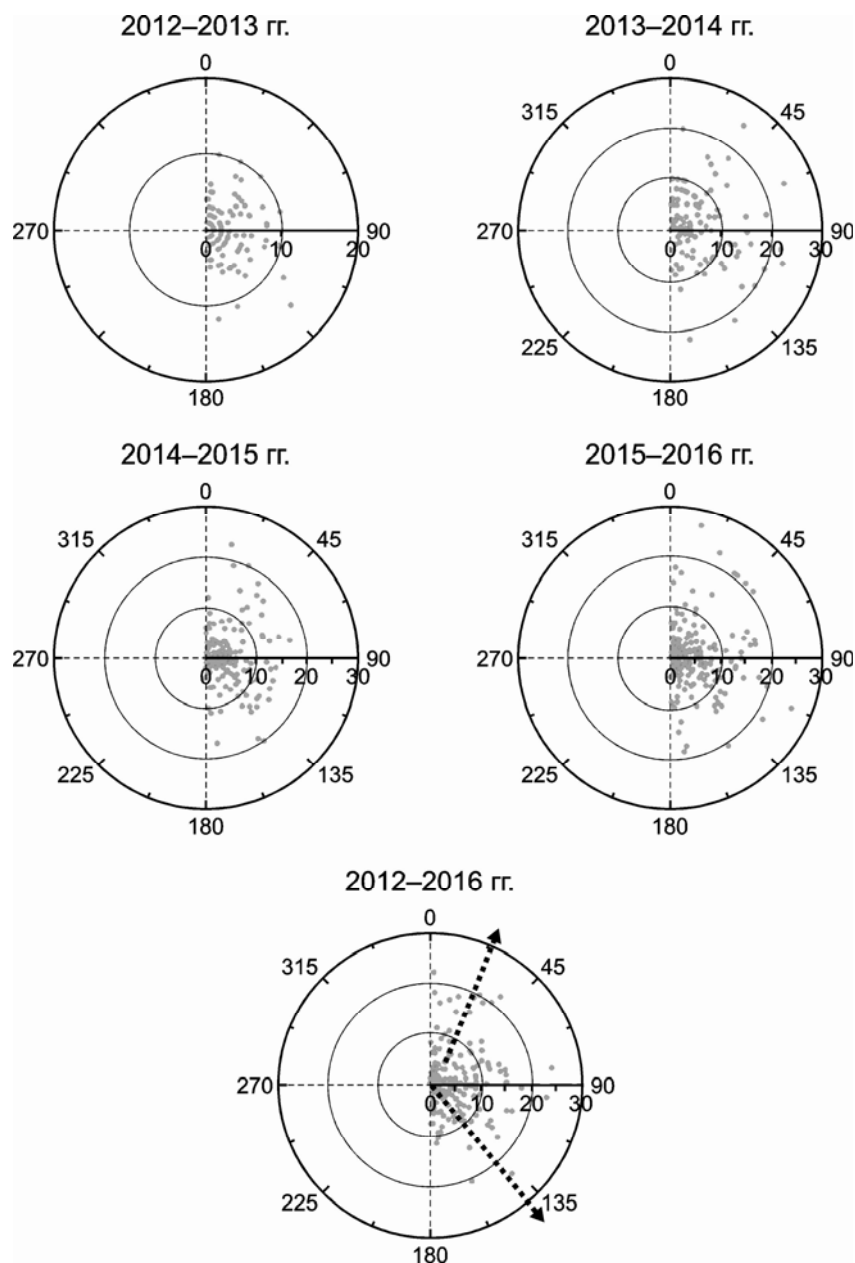


Рис. 7. Наблюдения 2012–2016 гг. Диаграммы распределения изменения длин базовых линий отдельно по эпохам и за весь период наблюдений (*внизу*). По радиусу отложены величины изменения ΔL

Fig. 7. Distributions of changes in the baseline lengths for separate yeas and the entire observation period from 2012 to 2016 (*bottom*). The values of changes ΔL are plotted along the radius

В эпохи 2013–2014., 2014–2015 и 2015–2016 гг. разброс существенно увеличился (особенно в 2013–2014 гг.), достигнув в отдельных случаях 20–26 мм. На диаграммах не прослеживается четко выраженных направлений максимальных изменений ΔL ; однако предварительно намечаются два – с азимутами около 10° и 135° , соответствующими направлению действия главных напряжений, которые показаны стрелками на диаграмме для всего периода наблюдений (см. рис. 7, *внизу*).

Выводы

В ходе исследований были получены следующие основные результаты.

1. Впервые для Нижне-Канского массива, находящегося 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 в нем геодинамического режима, связанного с силовым взаимодействием названных структур.

2. В течение 2010–2013 гг. была зарегистрирована относительно слабая геодинамическая активность (максимальные изменения базовых линий не превышали 10–12 мм). В 2013–2014 гг. имела место активизация геодинамического режима, проявившаяся в увеличении изменения длин базовых линий между пунктами наблюдений и в смене знака деформаций сжатия и растяжения соответственно на право- и левобережье р. Енисей. Годовые скорости максимального изменения длин базисных линий в период активизации достигали ± 20 мм/г. Среднеквадратические ошибки в плане и по высоте за 2012–2016 гг. составили 3–4 мм и 6–7 мм, соответственно для всех эпох наблюдения. Это доказывает природный характер зарегистрированной циклической тектонической активности в районе исследования.

3. В целом максимальные скорости современных движений земной коры были зафиксированы для линий, соединяющих пункты, находящиеся в зоне динамического влияния Муратовского, Правобережного и Большетельского разломов.

4. С увеличением времени наблюдений за счет влияния эффекта цикличности происходит снижение средних скоростей. За шестилетний период наблюдений лишь в редких случаях скорости по абсолютной величине превышают ± 5 мм/год; в основном (около 83 % базовых линий) они лежат в диапазоне ± 3 мм/год.

5. Расчет дилатации (скорости деформаций) земной поверхности за период с 2012 по 2015 гг. показал наличие четырех аномальных участков. Это – зона Атамановского разлома, который является контактными швом между Сибирской платформой и Западно-Сибирской плитой (пункты №№ 1204, 1205, 1206) – $\Delta = 5 \cdot 10^{-7}$ в год; участок на левом берегу р. Енисей (пункт № 1213) – $\Delta = -1.3 \cdot 10^{-7}$ в год; зоны сжатия и растяжения на участке “Енисейский” – $\Delta = 8 \cdot 10^{-8} \dots -3 \cdot 10^{-8}$ в год; участок, на котором находятся пункты №№ 1207, 1208, 1209 – $\Delta = -7 \cdot 10^{-8}$ в год. Сравнивая рассчитанные величины дилатации с критериями, приводимыми в литературе для геодинамически активных зон ($\Delta = \pm 5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$ в год), можно считать, что исследуемый район характеризуется относительно слабыми деформациями верхней части земной коры.

В целом можно утверждать о тектонической стабильности геологической среды в районе захоронения высокоактивных радиоактивных отходов. Однако геодинамический режим территории достаточно сложен в пространственно-временном отношении и развивается по нелинейному закону. Поэтому, учитывая природные особенности района, цикличность и масштабный пространственно-временной эффект, для надежного определения влияния этих факторов на геодинамические, тектонические и сейсмические условия участка “Енисейский” в соответствии с требованиями действующих норм и правил Ростехнадзора РФ необходимо продолжение инструментальных наблюдений ориентировочно в течение 5–6 лет.

Работа выполнена в рамках двух тем НИР – “Исследование кинематики блочных массивов при геодинамическом районировании мест размещения радиационно-опасных объектов” (№ АААА-А17-117012610082-9) и “Разработка и создание энергоэффективных вычислительных систем для геофизических исследований” (№ 0144-2014-0104).

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО “Геолком” во главе с Р.Р. Хафизовым и коллегам из ИФЗ РАН В.П. Передерину и Ф.В. Передерину, проводившим полевые наблюдения на геодинамическом полигоне.

Литература

- 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.: Изд-во “Горная книга”, 2011. 592 с.
- 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. 2007. № 2. С.248–266.
- Кафтан В.И. Анализ устойчивости геодезических пунктов и определение векторов смещений земной коры // Геодезия и картография. 1986. № 5. С.9–13.
- Кафтан В.И., Докукин П.А. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений // Геодезия и картография. 2007. № 9. С.18–22.
- Колмогорова П.П., Колмогоров В.Г. Современные вертикальные движения Алтае-Саянской области и их связь с новейшими движениями и сейсмичностью // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 6. С.567–578.
- Колмогорова П.П., Колмогоров В.Г. Современные вертикальные движения земной коры Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 6. С.455–466.
- Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство Экономических новостей, 1999. 220 с.
- Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Татаринов В.Н. Моделирование уровней опасности напряженно-деформированного состояния в структурных блоках Нижнеканского гранитоидного массива (к выбору участков захоронения радиоактивных отходов) // Геоэкология. 2011. № 6. С.524–542.
- Татаринов В.Н. Геодинамическая безопасность на объектах ядерного топливного цикла // Бюллетень “Использование и охрана природных ресурсов в России”. 2006. № 1. С.46–51.
- Татаринов В.Н., Татаринова Т.А. Учет масштабного эффекта при наблюдениях за деформациями земной поверхности спутниковыми навигационными системами // Маркшейдерский вестник. 2012. № 5. С.15–19.
- Татаринов В.Н., Бугаев Е.Г., Татаринова Т.А. К оценке деформаций земной поверхности по данным спутниковых наблюдений // Горный журнал. 2015. № 10. С.27–32. DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.10.05
- Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Каган А.И. Геодинамический мониторинг как основа сохранения биосферы при захоронении радиоактивных отходов // Науки о Земле. 2014. № 3. С.47–60.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Научный мир, 2009. 520 с.

Сведения об авторах

ТАТАРИНОВ Виктор Николаевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Геофизический центр РАН. 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3; ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(495) 930-51-39. E-mail: v.tatarinov@gcras.ru

МОРОЗОВ Владислав Николаевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Геофизический центр РАН. 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3. Тел.: +7(495) 930-51-39. E-mail: v.morozov@gcras.ru

КАФТАН Владимир Иванович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Геофизический центр РАН. 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3. Тел.: +7(495) 930-51-39. E-mail: v.kaftan@gcras.ru

МАНЕВИЧ Александр Ильич – младший научный сотрудник, Геофизический центр РАН. 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3. Тел.: +7(495) 930-51-39. E-mail: ai.manevich@yandex.ru

MODERN GEODYNAMICS OF THE SOUTHERN OF THE YENISEI RIDGE DERIVED FROM THE RESULTS OF SATELLITE OBSERVATIONS

V.N. Tatarinov^{1,2}, V.N. Morozov¹, A.I. Kaftan¹, A.I. Manevich¹

¹ *Geophysical Center of RAS, Moscow, Russia*

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

Abstract. The modern movement of the Earth's crust is studied for the northern part of the Nizhne-Kansky massif (Krasnoyarsk region), where it is planned to build an underground depository for radioactive waste in geological formations. The results are presented. The surveys based on GPS/GLONASS systems were conducted in 2010–2016 and allowed us to obtain new knowledge about the modern geodynamic regime of the region located in the contact zone of the largest tectonic structures of the Siberian Platform, the West Siberian Plate, and the Altai-Sayan orogen. The cyclic nature of modern geodynamic motions has been experimentally proved. A sharp activation of the tectonic regime was revealed in 2013–2014 that manifested itself in a change in the sign of compression and tension strains on the right and left banks of the Yenisei River in the contact zone of the Siberian platform and the West Siberian plate.

Maximum movement velocities were fixed at points located in the zone of dynamic influence of the Muratov and Pravoberezhnyi faults. Due to the cyclic effect, the absolute velocity values decrease with increasing the time of observations. Over the six-year observation period, they very rarely exceeded the value of ± 5 mm/year. Comparing the values of strain rates with the criteria published for identifying hazardous faults, it can be argued that the area is rather geodynamically stable, the maximum strain rates there do not exceed $5 \cdot 10^{-7}$ year⁻¹.

Keywords: modern crustal movements, satellite systems GPS/GLONASS, monitoring, radioactive waste.

References

- Anderson E.B., Belov S.V., Kamnev E.N., Kolesnikov I.Yu., Lobanov N.F., Morozov V.N., Tatarinov V.N. Underground isolation of radioactive waste. M.: "Mining book", 2011. 592 p.
- Belov S.V., Morozov V.N., Tatarinov V.N., Kamnev E.N., Hammer J. Study of the structure and geodynamic evolution of the Nizhnekansky Massif in connection with the disposal of highly radioactive waste, *Geoecology*, 2007, no. 2, pp. 248-266.
- Kaftan V.I. Analysis of the stability of geodetic points and determination of displacement vectors of the Earth's crust, *Geodesy and cartography*, 1986, no. 5, pp. 9-13.
- Kaftan V.I. Dokukin P.A. Determination of displacements and deformations from satellite geodetic measurements, *Geodesy and cartography*, 2007, no. 9, pp. 18-22.
- Khain V.E., Khalilov E.N. Cyclicity of geodynamic processes: its possible nature. M., Scientific world, 2009, 520 p.
- Kolmogorov P.P., Kolmogorov V.G. Modern Vertical Motions of the Altai-Sayan Region and Their Connection with the Newest Movements and Seismicity, *Geology and Geophysics*, 2002, vol. 43, no. 6, pp. 567-578.
- Kolmogorov P.P., Kolmogorov V.G. Modern Vertical Motions of the Earth's Crust of the Yenisei Range, *Geology and Geophysics*, 2004, vol. 45, pp. 455-466.
- Kuzmin Yu.O. Modern geodynamics and assessment of geodynamic risk in subsoil use. M.: Agency of Economic News, 1999, 220 p.

- Morozov V.N., Kolesnikov I.Yu., Tatarinov V.N. Modeling of the levels of danger of stress-strain state in structural blocks of the Nizhnekansk granitoid massif (to the choice of radioactive waste disposal sites), *Geoecology*, 2011, no. 6, pp. 524-542.
- Tatarinov V.N. Geodynamic safety at nuclear fuel cycle facilities, *Bulletin "Use and protection of natural resources in Russia"*, 2006, no. 1, pp. 46-51.
- Tatarinov V.N., Bugaev EG, Tatarinova T.A. To the estimation of deformations of the earth's surface according to satellite observations, *Mining Journal*, 2015, no. 10, pp. 27-32, DOI: [dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.10.05](https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.05)
- Tatarinov V.N., Morozov V.N., Kaftan V.I., Kagan A.I. Geodynamic monitoring as a basis for conservation of the biosphere in the disposal of radioactive waste, *Sciences about the Earth*, 2014, no. 3, pp. 47-60.
- Tatarinov V.N., Tatarinova T.A. Consideration of the scale effect during observations of deformations of the earth's surface by satellite navigation systems, *Mine Surveying herald*, 2012, no. 5, pp. 15-19.