

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДОК РАЗМЕЩЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Юлия Павловна Коновалова
lisjul@mail.ru

Институт горного дела УрО РАН
Россия, Екатеринбург

Актуальность проблемы. Проблема обеспечения безопасного размещения особо ответственных объектов исключительно актуальна. Достоверная оценка явлений и процессов, происходящих в массиве горных пород, является важным моментом в выборе площадок строительства таких объектов. Одним из факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние массива, являются современные геодинамические движения. Нормативные документы, регламентирующие критерии и требования по обеспечению безопасности при размещении ответственных и опасных объектов, не полностью соответствуют уровню современных представлений о геодинамических движениях. Причины отсутствия методики диагностики современной геодинамической активности массива, пригодной для массовой реализации в практике инженерных изысканий, заключаются в сложности выявления и учета пространственно-временных закономерностей распределения параметров геодинамических движений.

Целью работы является исследование распределения деформаций, обусловленных современными геодинамическими движениями, в иерархически-блочном массиве горных пород на разных пространственно-временных базах для совершенствования методики геодинамической диагностики площадок размещения ответственных объектов.

Методы исследования: анализ и обобщение результатов геодезического мониторинга трендовых и циклических короткопериодных геодинамических движений, полученных на локальных геодинамических полигонах на базах от десятков метров до 25 км.

Результаты. По данным повторных геодезических измерений на базах от десятков метров до 25 км за временной интервал от нескольких часов до 3–4 десятков лет, установлены зависимости модуля относительных деформаций от длины реперного интервала. На основании зависимостей получены максимальные значения деформаций, которые могут быть использованы в качестве критических деформационных критериев при исследовании территорий различной площади и выборе параметров мониторинговой сети. При сопоставлении деформационных параметров трендовых и короткопериодных движений одних и тех же реперов наблюдательной сети установлена взаимосвязь в ориентации главных осей тензоров деформаций, рассчитанных по данным измерений за длительный промежуток времени и за суточный сеанс непрерывных измерений с дискретностью замера 10–20 мин.

Выводы. На основании выявленных закономерностей распределения деформационных параметров геодинамических движений в массиве горных пород обоснованы и представлены основные принципы выбора безопасных мест размещения особо ответственных объектов недропользования.

Ключевые слова: современные геодинамические движения, ответственные объекты недропользования, атомная станция, иерархически-блочный массив, самоорганизация, деформация, геодинамическая диагностика.

Введение
В связи с масштабным освоением мегаполисов, развитием городской инфраструктуры, появлением новых высотных объектов, сооружений уникальной конструкции вопросы их безопасного размещения и функционирования приобретают все большую актуальность и значимость. Первостепенная роль в этих вопросах отводится особо ответственным и экологически опасным объектам, таким как атомные и гидроэлектростанции, нефте- и газопроводы, захоронения токсичных и радиоактивных отходов, горнодобывающие предприятия, метрополитены. Безопасное функционирование любого объекта недропользования зависит не только от его конструктивных особенностей, но и от достоверной и обоснованной оценки явлений, происходящих в среде, где он создан, т. е. в массиве горных пород.

Одним из факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние массива, процессов и явлений, имеющих в нем место, являются современные геодинамические движения, протекающие в приповерхностной части литосферы и на земной поверхности в настоящее время и прогнозируемые на период срока службы объекта недропользования. Долгое время современные движения земной коры и земной поверхности рассматривались главным образом во взаимосвязи с землетрясениями, на основе чего и были разработаны методики и нормативные документы по сейсмическому районированию и сейсмостойкому строительству. Деформационным процессам, обусловленным медленными геодинамическими движениями, проявляющимися во временном интервале от нескольких суток до десятков лет, в нормативной документации, регламентирующей требования по обеспечению безопасности размещения объектов недропользования, также уделялось внимание. Однако следует отметить, что критерии и требования безопасности в нормативах по размещению объектов использования атомной энергии не соответствуют уровню современных представлений о геодинамических движениях и механизме их воздействия на объекты недропользования [1]. Накопленный опыт экспериментальных исследований на геодинамических полигонах, результаты геодезических наблюдений на постоянно действующих станциях ГНСС свидетельствуют о повсеместной распространенности таких движений не только в сейсмически опасных регионах, но и в асейсмичных районах в зонах, прилегающих к тектоническим нарушениям [2]. В работах авторов, занимающихся исследованиями влияния движений на объекты недропользования, установлено, что игнорирование геодинамического фактора при инженерных изысканиях может стать причиной возникновения аварийных состояний, вплоть до разрушения конструкций зданий и сооружений – от жилых домов до особо ответственных объектов [3–8]. Но проведение специальных изысканий по геодинамической диагностике не вошло в практику даже для особо ответственных объектов.

На практике в конце 1980-х–начале 1990-х гг. на предпроектной стадии изысканий для строительства Игналинской, Крымской, Калининградской АЭС оценка тектонической активности земной поверхности и разломов производилась только по фондовым геодезическим материалам в комплексе с данными по неотектонике и сейсмичности [9, 10]. В конце 1990-х гг. с внедрением спутниковых методов выполнялись исследования геодинамической активности

на Кольской, Калининской и Ново-Воронежской АЭС, которые были направлены на выявление трендовых движений только как предвестников землетрясений. Движения в качестве фактора непосредственного влияния на устойчивость и безопасность объектов не рассматривались [11]. Большое внимание вопросам разработки методических основ прогнозирования горизонтальных движений и дифференцирования земной поверхности по скоростям деформаций на основе применения спутниковых систем для геодинамического районирования при выборе мест подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов уделено в 2000-х гг. в работах В. Н. Татарникова и В. Н. Морозова [12].

Однако до настоящего времени методика диагностики современной геодинамической активности массива горных пород, пригодная для массовой реализации в практике инженерных изысканий, не разработана. Одна из главных причин отсутствия такой методики заключается в сложности выявления и учета пространственно-временных закономерностей распределения геодинамических движений.

Геодинамические аспекты выбора безопасных площадок строительства

Как известно, массив горных пород представляет собой иерархически-блочную среду, в которой структурная иерархия блоков существует на различных масштабных уровнях. Каким бы малым ни был масштаб, в среде всегда будут присутствовать структурные неоднородности сравнимого с этим масштабом иерархического уровня. Геодинамические движения, проявляющиеся на различном пространственно-временном уровне, вызывают деструкцию иерархически-блочного массива, которая приводит к дискретному характеру распределения деформаций на всех уровнях иерархической блочности массива [13]. Деформации на границах блока выше, чем внутри блока, а внутриблочные подвижки формируются за счет межблочных подвижек блоков более низкой иерархии. Геодинамическая активность структурного нарушения, как показывают многочисленные исследования, не связана с его рангом. Более того, даже по самому нарушению может наблюдаться неравномерность в распределении геодинамических параметров [14]. Основываясь только на таком представлении геомеханической модели массива, выбрать безопасную и устойчивую площадку довольно сложно. Однако массив является открытой нелинейной системой, в которой под действием геодинамических движений в деструктурированной иерархически-блочной среде происходит процесс самоорганизации – формирование блоков, включающих структурные блоки различных рангов, сохраняющих относительную целостность и свойства, близкие к сплошной среде. Границы таких вторичных структур являются зонами повышенной концентрации геодинамических смещений и деформаций. Поэтому задача выбора безопасных площадок строительства сводится к выявлению таких блоков, чтобы не допустить размещение объекта на их границах, где имеют место повышенные значения деформаций, влияющие на его устойчивость.

Для выявления вторичного структурного блока необходима геодинамическая диагностика территории по телескопическому принципу: от районов площадью в десятки-сотни квадратных километров до площадок, сопоставимых по размеру с размещаемым объектом. Так, например, для выбора мест безопасного размещения АЭС в отечественной и мировой практике проводятся изыскания региона, района (100 × 150 км), пункта (10 × 15 км), площадки (3 × 5 км) АЭС, позволяющие по мере приближения к месту размещения объекта повышать детальность и достоверность обоснования безопасности. Поскольку при блоковой модели строения среды деформации не являются инвариантной величиной, то необходимы знания закономерностей распределения деформаций на различных базах измерения и за разные временные интервалы. Кроме того, при переходе исследований от одного пространственно-временного уровня к другому необходимы свои деформационные критерии, величины которых в нормативных документах не приводятся.

Кроме того, ни в одном нормативном документе не учитывается фактор цикличности современных геодинамических движений, имеющий важное значение при геодинамической диагностике территорий. Наблюдения за современными геодинамическими движениями проводятся обычно геодезическими методами в режимах дискретного и непрерывного мониторинга. В зависимости от продолжительности сеанса измерений и частоты опроса выделяются различные циклы движений, в связи с чем их можно подразделить на длиннопериодные движения с циклами от нескольких суток до нескольких лет, трендовые, которые имеют относительно постоянную скорость и направленность, и короткопериодные движения с продолжительностью циклов от нескольких минут до нескольких часов. На большие циклы накладываются циклы меньшей продолжительности. А трендовые движения являются, скорее всего, движениями с большим периодом колебаний. Зачастую амплитуды циклических движений превосходят по величине трендовую составляющую.

Цикличность современных геодинамических движений может по-разному влиять на объекты недропользования. Объекты, попадающие на активные тектонические структуры с трендовыми движениями, нарушаются, когда в их конструкции достигаются предельные деформации. Воздействие циклических движений может проявляться в непосредственном влиянии циклических деформаций на сам объект, когда амплитуда знакопеременных деформаций превысит допустимые деформации конструктивных элементов сооружения, от проявления усталостных эффектов при деформациях ниже допустимых значений, а также через изменение свойств массива горных пород в разломных зонах под влиянием переменных циклических нагрузжений [15].

Выявлению причин цикличности движений посвящено много исследований. Однозначно лишь можно отметить, что обусловлена она множеством факторов эндогенного и экзогенного характера [16–20]. Несмотря на то что вопросы о степени влияния на напряженно-деформированное состояние горного массива того или иного фактора, обуславливающего переменность движений, остаются пока спорными и неоднозначными, очевидно, что значения деформаций, определенные без учета цикличности движений, могут быть занижены. Особенно это касается короткопериодных движений, имеющих циклы от нескольких минут до нескольких часов, поскольку их прямое или опосредованное воздействие на объект недропользования может быть существенным.

Коллективом отдела геомеханики Института горного дела УрО РАН к настоящему времени проведено экспериментальное определение параметров современных геодинамических движений более чем на 35 объектах недропользования, охватывающих территорию от Центрального региона до Якутии, а также Казахстана в режимах дискретного и непрерывного мониторинга. На их основе создана база данных о современных геодинамических движениях. Анализ

параметров движений и деформаций, вызываемых ими, позволил выявить некоторые пространственно-временные закономерности их распределения, способствующие совершенствованию методики геодинимической диагностики территорий для оценки и выбора площадок размещения ответственных объектов.

Результаты исследования пространственно-временных закономерностей геодинимических движений

Для исследования пространственно-временных закономерностей современных геодинимических движений были использованы результаты дискретных и непрерывных мониторинговых геодезических наблюдений, полученные ИГД УрО РАН на локальных геодинимических полигонах России и Казахстана. В качестве исследуемого параметра выбрано значение модуля относительных горизонтальных деформаций для различных длин реперных интервалов. При средней точности определения смещения базовой линии ГНСС-методами на уровне 3 мм погрешность расчета относительной деформации составляет от 3×10^{-5} до $1,2 \times 10^{-7}$ для интервалов от 100 м до 25 км соответственно.

На рис. 1 приведены зависимости модуля относительных деформаций от длины реперного интервала, полученные в результате определения трендовых движений пунктов на базах до 25 км за период 35–40 лет на месторождениях России и Казахстана: Качарском железорудном, Киембаевском хризотил-асбестовом, хромитовых месторождениях Донского ГОКа (г. Хромтау), Соколовском и Сарбайском месторождениях (г. Рудный). Из графика видно, что средний уровень деформаций для одних и тех же длин интервалов за 40-летний период отличен для разных территорий, но максимальные значения деформаций находятся в диапазоне от 4×10^{-5} до 4×10^{-4} .

Деформации, вызываемые циклическими короткопериодными движениями, которые выделяются в ходе непрерывных GPS-наблюдений длительностью от нескольких часов до суток, представлены на рис. 2. Продолжительность их циклов укладывается один и более раз в сеанс наблюдений и может составлять от нескольких минут до нескольких часов. Методика определения короткопериодных движений изложена в работе [21]. Измерения короткопериодных движений выполнены на локальных геодинимических полигонах Урала и Казахстана площадью 10×15 км при длинах реперных интервалов от десятков метров до 5 км, поскольку на более длинных базах не всегда удается регистрировать движения на достаточном уровне точности. Относительные горизонтальные деформации рассчитаны по размаху между максимальным и минимальным значением смещения за весь сеанс наблюдений. Из графика очевидно, что за многочасовой сеанс наблюдений короткопериодная составляющая геодинимических движений может достигать и даже превышать трендовую составляющую за десятки лет для одних и тех же баз измерений.

Таким образом, на любом пространственно-временном уровне по мере увеличения базы измерений максимальные значения модуля относительных горизонтальных деформаций уменьшаются в соответствии со степенными зависимостями, что характеризует механизм деформирования массива горных пород переходом от условий, отображаемых моделью дискретной среды, к условиям сплошной квазиупругой среды, когда количество блоков увеличивается и взаимные разнонаправленные подвижки структурных блоков компенсируются. Используя полученные эмпирические зависимости, можно оценить максимально возможные значения горизонтальных деформаций на базах от десятков метров до десятков километров за временные интервалы от нескольких часов до нескольких десятилетий, которые могут быть использованы в качестве критических деформационных критериев при исследовании территорий различной площади

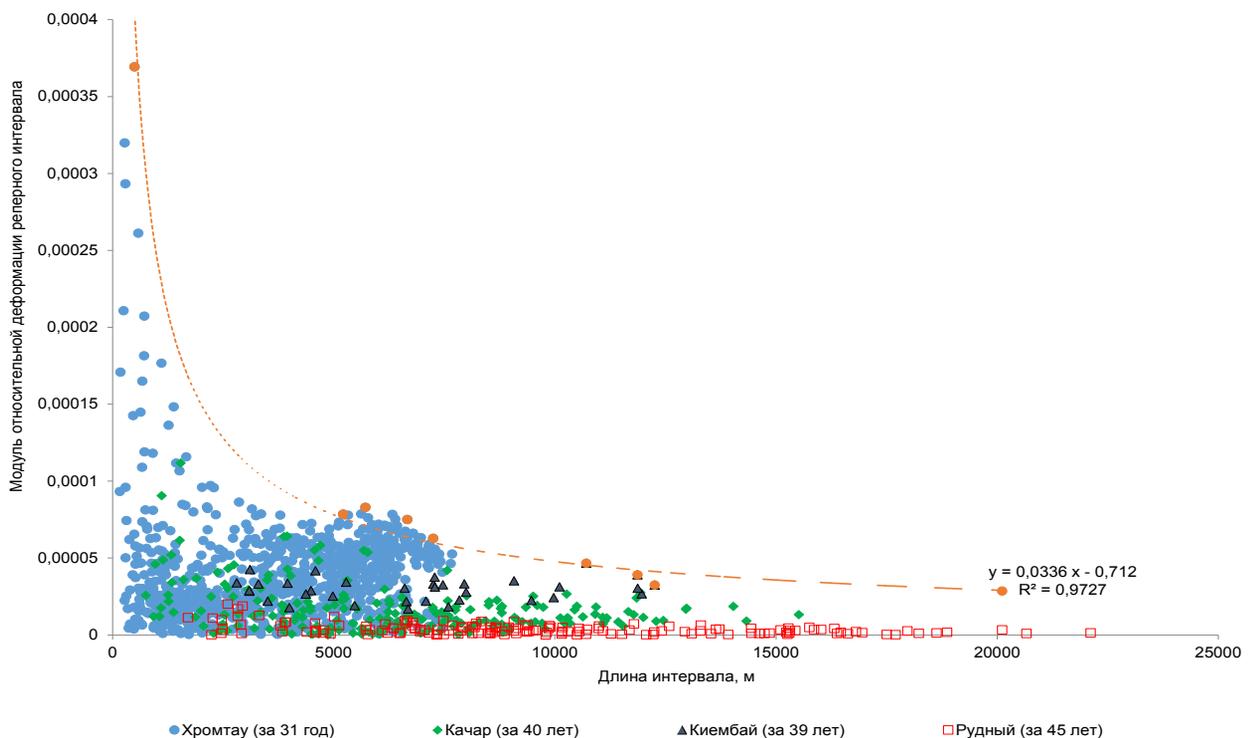


Рисунок 1. Распределение модуля относительных горизонтальных деформаций при длинах реперных интервалов до 25 км (по данным трендовых движений за период 35–40 лет на месторождениях России и Казахстана).

Figure 1. Distribution of the modulus of relative horizontal deformations at lengths of bench intervals up to 25 km (according to trend movement data for the period of 35–40 years in the deposits of Russia and Kazakhstan).

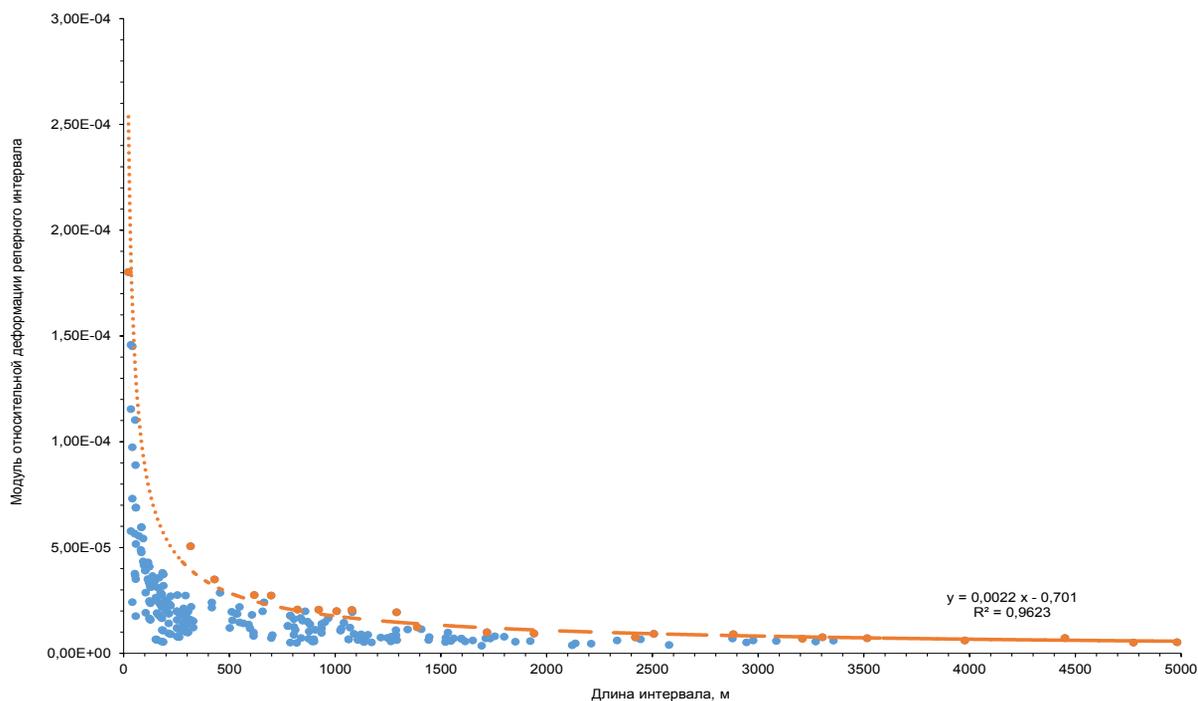


Рисунок 2. Распределение модуля относительных горизонтальных деформаций при длинах реперных интервалов до 5 км (по данным короткопериодных движений на геодинамических полигонах Урала и Казахстана).
 Figure 2. Distribution of the modulus of relative horizontal deformations at lengths of bench intervals up to 5 km (according to the data of short-period movements at geodynamic technological test sites of the Urals and Kazakhstan).

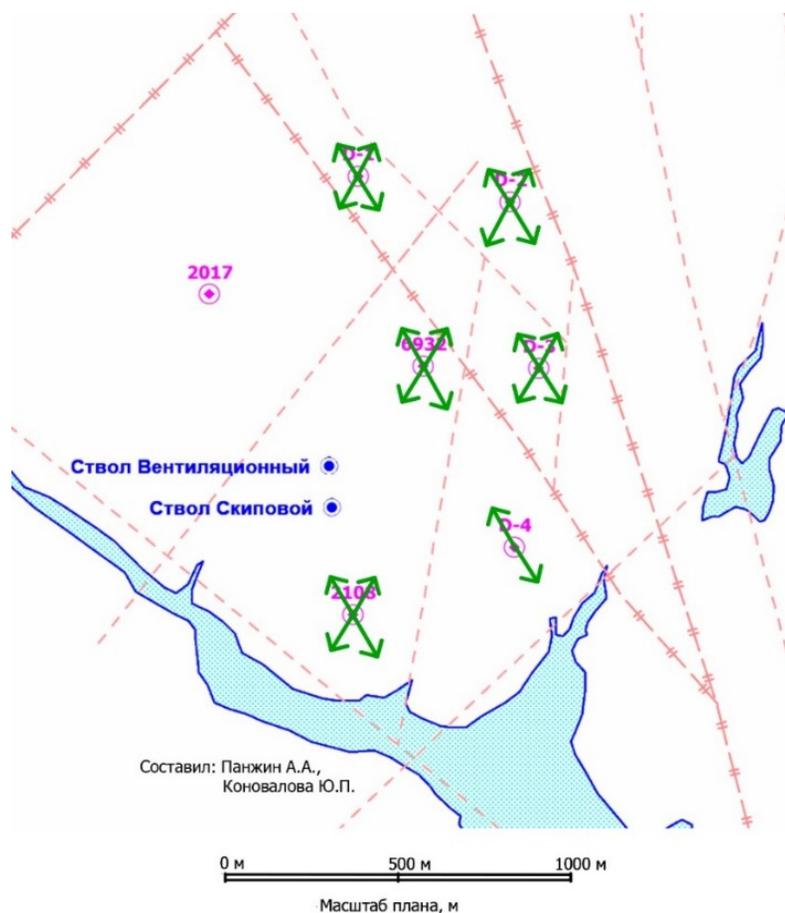


Рисунок 3. Преобладающие направления короткопериодных движений блоков за сеанс непрерывных наблюдений в окрестностях стволов «Вентиляционный» и «Скиповой» (Донской ГОК, г. Хромтау).
 Figure 3. The predominant directions of short-period block movements for a continuous surveillance session in the vicinity of the well holes “Ventilyatsionnyy” and “Skipovoy” (Donskoy mining and refining plant, Khromtau).

(район, пункт, площадка). Кроме того, представленные зависимости позволяют выбрать оптимальные параметры мониторинговой сети для различных пространственных масштабов.

Исследования короткопериодных геодинамических движений в ходе многочасового непрерывного мониторинга с дискретностью замеров 10–20 мин показали, что в течение сеанса наблюдений имеют место часто встречающиеся направления смещения реперов. На рис. 3 представлен пример выделения приоритетных направлений смещений реперов за 10-минутные дискретные интервалы многочасовых наблюдений в окрестностях стволов «Вентиляционный» и «Скиповой» Донского ГОКа, г. Хромтау. В данном примере преобладающими направлениями оказались северо-запад–юго-восток и северо-восток–юго-запад, что совпадает с простираем основных тектонических нарушений.

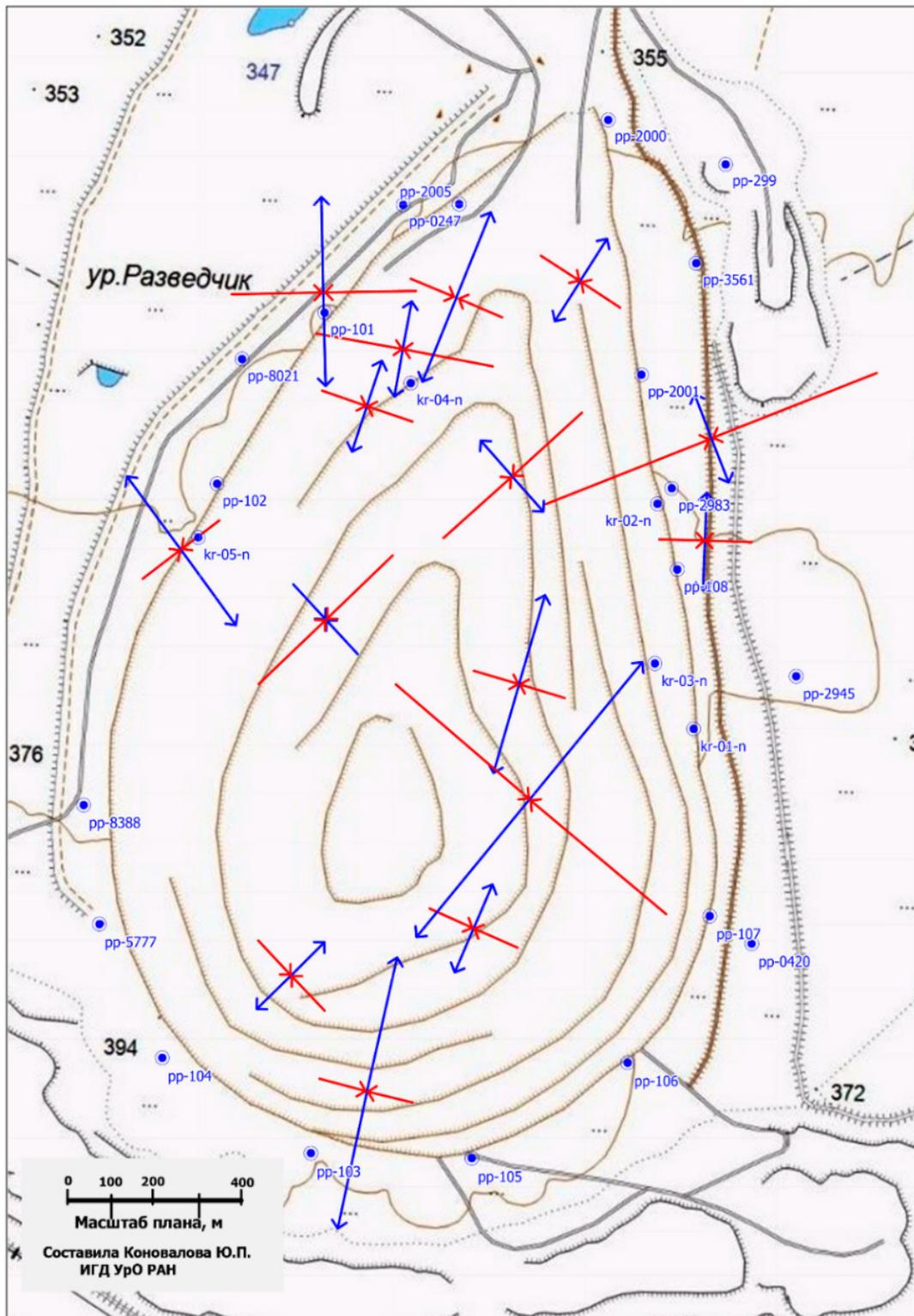


Рисунок 4. Тензоры горизонтальных деформаций на территории карьера АО «Оренбургские минералы» за период 2006–2017 гг.
Figure 4. Tensors of horizontal deformations in the territory of JSC “Orenburg minerals” open cut for the period 2006–2017.

Если короткопериодные движения представляют собой колебания вдоль тренда, то естественно предположить, что преобладающие направления подобных колебаний должны совпадать с преобладающим направлением трендовых подвижек реперов и, соответственно, с ориентацией главных осей тензора напряженно-деформированного состояния. С целью проверки данного предположения была разработана методика, позволяющая по амплитудам короткопериодных движений, представляющих собой разность между минимальным и максимальным значением смещений в наборе дискретных измерений суточного сеанса наблюдений, и преобладающим направлениям смещений реперов определить параметры тензоров деформаций горного массива; благодаря этому можно получить поле максимальных деформаций за многочасовой период.

В ходе проведенных исследований и экспериментов была установлена взаимосвязь в ориентации главных осей тензора деформаций, рассчитанного по данным измерений за длительный промежуток времени (раз в несколько лет), с ориентацией главных осей тензора деформаций, полученного за многочасовой сеанс непрерывных измерений с дискретностью замера 10–20 мин. На рис. 4, 5 представлены примеры определения тензоров горизонтальных деформаций за 10-летний период и за суточный сеанс непрерывных измерений короткопериодных движений в окрестностях карьер-

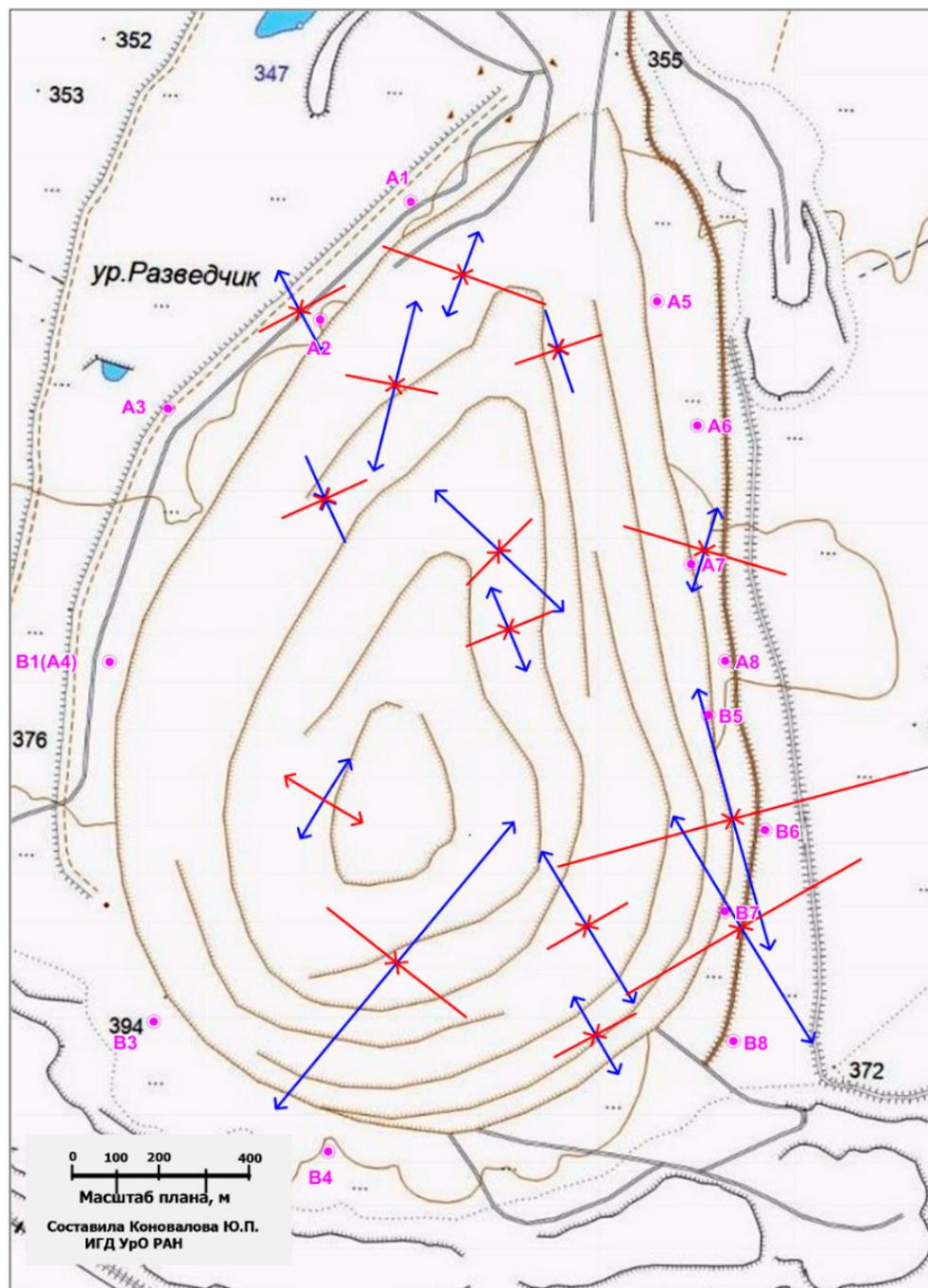


Рисунок 5. Тензоры горизонтальных деформаций на территории карьера АО «Оренбургские минералы» за суточный сеанс непрерывных измерений короткопериодных геодинамических движений.

Figure 5. Tensors of horizontal deformations in the territory of JSC “Orenburg minerals” open cut for a daily session of continuous measurements of short-period geodynamic movements.

ера АО «Оренбургские минералы». В обоих случаях измерения выполнены спутниковыми методами на идентичных пунктах опорной маркшейдерской сети при расстояниях на базах от 200 м до 2 км.

Выявленная закономерность позволяет за непродолжительное время по результатам измерений непрерывных короткопериодных движений оценить напряженно-деформированное состояние массива горных пород. Особенно эффективна такая методика геодинамической диагностики горного массива при исследовании территорий, на которых отсутствует возможность определения трендовых движений за длительный период времени.

Методика оценки площадок строительства ответственных объектов по геодинамическому фактору

Таким образом, проведенные исследования показывают, что методика выбора и оценки вторичных структурных блоков под безопасное размещение объектов по фактору геодинамических движений должна включать:

- использование комплексного подхода, т. е. изучение структурно-тектонических особенностей массива (геофизические методы) и определения геодезическими методами основных параметров движений: амплитуды, частоты (периода) циклов и деформаций, вызываемых этими движениями;
- проведение исследований на различных пространственных уровнях, начиная с территорий от 100–150 км до размеров, сопоставимых с размерами объекта, с учетом закономерностей распределения деформаций на различных базах измерения;
- проведение исследований на различных временных уровнях (трендовые и короткопериодные движения);
- комбинирование спутниковых и наземных методов наблюдения.

Последовательное пространственное уменьшение масштаба изучаемой территории является основным принципом в геодинамической диагностике любой территории. Так, например, при выборе площадок под строительство АЭС нормативные документы рекомендуют начинать исследования с изучения района строительства АЭС – территорий радиусом 100–200 км. Обычно изучение района не подразумевает постановку специальных измерений, а ограничивается лишь анализом топографо-геодезических материалов, карт современных движений земной коры, данных космических снимков. Однако использование ГНСС позволяет получать трендовые движения пунктов Государственной геодезической сети, которые определяются на основе анализа изменений их пространственных координат, происходящих в промежутках между повторными циклами наблюдений, в том числе за промежуток времени с момента первых измерений на пунктах, произведенных после их заложения до периода проведения полевых наблюдений. По полученным разностям пространственных координат определяются полные векторы смещений пунктов, отражающие произошедшие за этот период движения земной коры и вызванные ими деформации. В ходе анализа деформационного поля района и сопоставления деформаций с максимально возможными их значениями, полученными на основании эмпирических данных на соответствующем пространственно-временном уровне, например, таких, как на [рис. 1](#), выбираются альтернативные пункты строительства, имеющие размеры около 10 × 15 км.

При исследовании альтернативных пунктов строительства также определяются трендовые движения пунктов Государственной сети. Для выявления дискретного характера деформирования массива горных пород в соответствии с полученными степенными зависимостями модуля относительных горизонтальных деформаций от баз измерений длина стороны наблюдательной сети не должна превышать 6–7 км. При отсутствии необходимого количества пунктов геодезических сетей на данном пространственном уровне возможно проведение непрерывных спутниковых измерений на новых реперах с целью получения параметров короткопериодных движений и деформаций по методике, принципы которой излагались в предыдущем разделе. На основании сравнения результатов геодинамической диагностики на альтернативных пунктах строительства выбирается приоритетный пункт.

На приоритетном пункте исследуются альтернативные площадки, размеры которых составляют примерно 3 × 5 км. На площадках производится тщательное изучение структуры горного массива геофизическими методами. В соответствии с выделенными тектоническими нарушениями и неоднородностями создаются мониторинговые сети для выявления короткопериодных геодинамических движений путем многочасового непрерывного мониторинга системами ГНСС. Длина стороны такой сети в соответствии с эмпирическими данными, представленными на [рис. 2](#), не должна превышать 1000 м. Для оценки деформационных параметров массива площадок кроме методов непрерывного спутникового мониторинга должны применяться, исходя из соображений точности, традиционные наземные геодезические измерения (высокоточное нивелирование, высокоточные линейные измерения).

Использование методики учета геодинамического фактора при выборе безопасных мест размещения ответственных объектов недропользования позволяет существенно повысить достоверность оценок альтернативных площадок и тем самым обеспечить безопасную эксплуатацию зданий и сооружений. Основные принципы, на которых базируется методика, неоднократно использовались для геодинамической диагностики различных территорий, а результаты ее практического применения для выбора площадок размещения сооружений АЭС изложены в работах [22, 23].

Выводы

Выбор безопасных мест размещения объектов недропользования основывается на использовании явления вторичного структурирования иерархически-блочной самоорганизующейся среды под воздействием современных геодинамических движений. Для выявления вторичного структурного блока необходимы знания закономерностей распределения деформаций, обусловленных этими движениями, на различном пространственно-временном уровне. Анализ и обобщение большого объема параметров современных геодинамических движений позволили выявить некоторые особенности в их распределении.

Установлены максимально возможные значения деформаций для различных территорий на базах от десятков метров до 25 км за временной интервал от нескольких часов до 3–4 десятков лет. Полученные значения могут использоваться в качестве критических деформационных критериев при исследовании территорий различной площади.

По выявленным зависимостям модуля относительных горизонтальных деформаций от длин реперных интервалов определены базы измерений, при которых механизм деформирования горного массива характеризуется переходом от

условий модели дискретной среды к условиям сплошной квазиупругой среды для пространственных масштабов до 25 и 5 км. Это позволяет выбрать оптимальную длину стороны мониторинговой сети на соответствующих пространственных уровнях.

При исследовании короткопериодных и трендовых движений, имеющих периоды от нескольких десятков минут до нескольких лет, установлено, что короткопериодная составляющая может достигать и даже превышать трендовую составляющую для одних и тех же баз измерений. В связи с этим для учета короткопериодных движений при геодинамической диагностике горного массива разработана методика, позволяющая получать усредненное поле деформаций за многочасовой период наблюдений. При сопоставлении деформационных параметров трендовых и короткопериодных движений одних и тех же реперов мониторинговой сети установлена взаимосвязь в ориентации главных осей тензоров деформаций, рассчитанных по данным измерений за длительный промежуток времени и за суточный сеанс непрерывных измерений с дискретностью замера 10–20 мин. Выявленная закономерность позволяет осуществлять экспресс-оценку напряженно-деформированного состояния массива горных пород за непродолжительный непрерывный сеанс измерений короткопериодных движений

Выявленные особенности деформационных процессов в горном массиве на различных пространственных и временных базах позволяют оптимизировать методику выбора безопасных мест размещения особо ответственных объектов недропользования по фактору современных геодинамических движений.

Исследования выполнены в рамках программы ФНИ п. 136, тема № 0405-2015-0012.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сашурин А. Д. Уровень обеспеченности геодинамической безопасности объектов атомной энергетики // ГИАБ. 2010. № 12. С. 214–218.
2. Kuzmin Yu. O. Recent geodynamics of the faults and paradoxes of the rates of deformation // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2013. Vol. 49, Issue 5. September. P. 626–642.
3. Kuzmin Yu. O. Recent geodynamics of dangerous faults // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2016. Vol. 52, Issue 5. September. P. 709–722.
4. Современные активные зоны нарушения сплошности верхней части земной коры на территории Екатеринбурга / А. Н. Гуляев [и др.] // Инженерная геология. 2008. № 2. С. 13–16.
5. Тагильцев С. Н., Осипова А. Ю., Лукьянов А. Е. Выделение активных тектонических структур на территории г. Екатеринбурга // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф. (14–15 окт. 2009 г.). Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2009. С. 28–36.
6. Сашурин А. Д. Геодинамические истоки крупнейших природно-техногенных катастроф // ГИАБ. 2011. № 11. С. 225–236.
7. Учитель И. Л. Разрушительные свойства геодформаций. Одесса: Астропринт, 2010. 222 с.
8. Селюков Е. И., Стигнеева Л. Т. Краткие очерки практической микрогеодинамики. СПб.: Питер, 2010. 175 с.
9. Серебрякова Л. И. Оценка геодинамической активности территории строительства Крымской АЭС по геодезическим данным // Геодезия и картография. 2012. № 6. С. 46–52.
10. Серебрякова Л. И. Закономерности и особенности вертикальных движений земной поверхности территории Игналинской АЭС // Геодезия и картография. 2012. № 7. С. 57–63.
11. Татаринов В. Н. Ново-Воронежская АЭС. GPS-наблюдения в районе АЭС. М.: ГЦ РАН, 2000. 12 с.
12. Tatarinov V., Seelev I., Tatarinova T. The results of GNSS observations in the area of the underground disposal of radioactive waste (Yenisei Ridge) // IMCET 2017: New Trends in Mining: Proceedings of 25th International Mining Congress of Turkey 25, New Trends in Mining. 2017. С. 534–541.
13. Конавалова Ю. П. Геодинамические аспекты выбора безопасных площадок размещения особо ответственных объектов недропользования // ГИАБ. 2011. № 11. С. 133–138.
14. Kenneth M. Cruikshank, Curt D. Peterson. Current State of Strain in the Central Cascadia Margin Derived from Changes in Distance between GPS Stations // Open Journal of Earthquake Research. 2015. Vol. 4. P. 23–36.
15. Сашурин А. Д. Современная геодинамика и техногенные катастрофы // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф. (19–21 нояб. 2002 г.). Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2003. С. 180–191.
16. Bos M., Bastos L., Fernandes R. The influence of seasonal signals on the estimation of the tectonic motion in short continuous GPS time-series // Journal of Geodynamics. 2010. Vol. 49, Issue 3–4. April. P. 205–209.
17. Biessy G., Moreau F., Dauteuil O., Bour O. Surface deformation of an intraplate area from GPS time series // Journal of Geodynamics. 2011. Vol. 52, Issue 1. July. P. 24–33.
18. Güral E., Erdođan H., Tiryakiođlu I. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis // Digital Signal Processing: A Review Journal. 2013. Vol. 23, Issue 6. December. P. 1945–1957.
19. He X., Hua X., Yu K., Xuan W., Lu T., Zhang W., Chen X. Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering // Advances in Space Research. 2015. Vol. 55, Issue 5. March. P. 1316–1327.
20. He X., Montillet J.-P., Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources // Journal of Geodynamics. 2017. Vol. 106. May. P. 12–29.
21. Панжин А. А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии // Маркшейдерия и недропользование. 2003. № 2. С. 43–54.
22. Конавалова Ю. П. Исследование циклических короткопериодных геодинамических деформаций территорий при выборе площадки под строительство атомных станций // ГИАБ. 2010. № 7. С. 269–274.
23. Пустуев А. Л. Исследование трендовых геодинамических деформаций при выборе площадок для строительства атомных станций // ГИАБ. 2011. № 1. С. 282–290.

Статья поступила в редакцию 7 мая 2018 г.

Study of regularities of deformation processes in the rock mass for estimation of sites for important objects of subsoil use

Yuliya Pavlovna Konovalova
lisjul@mail.ru

Mining Institute of the Ural Branch of RAS
Ekaterinburg, Russia

Relevance of the problem. The problem of ensuring the safe placement of vital objects is extremely urgent. A proper evaluation of the phenomena and processes occurring in the rock mass is an important point in the choice of sites for the construction of such facilities. One of the factors determining the stressed-deformed state of the massif is modern geodynamic movements. Regulatory documents providing the criteria and requirements for ensuring security when placing some important and dangerous objects do not fully correspond to modern outlooks about geodynamic movements. The reasons for the lack of a technique for diagnosing the current geodynamic activity of the massif suitable for mass implementation in engineering surveys lie in the complexity of identifying taking into account patterns in either space or time in the distribution of the parameters of geodynamic movements.

Purpose of the work is to study the distribution of deformations due to modern geodynamic movements in a hierarchically blocky rock massif to improve the geodynamic diagnostics methodology for the location of important objects.

Methods of research: analysis and generalization of the results of geodetic monitoring of trend and cyclic short-period geodynamic movements obtained at local geodynamic technological test site from tens of meters to 25 km.

Results. According to repeated geodetic measurements at the bases from tens of meters to 25 km for a time interval of several hours to 3-4 decades, the dependencies of the relative strain module on the length of bench interval are established. Based on the dependencies, the maximum values of deformations that can be used as critical deformation criteria for the study of territories of different areas and the choice of parameters of the monitoring network are obtained. When the deformation parameters of trend and short-period movements of the same benches of the observational network are compared, the relations are established in the orientations of the principal strain axis calculated from measurements over a long period of time and over a daily session of continuous measurements with a discreteness of 10-20 minutes.

Conclusion. Based on the revealed regularities in the distribution of the deformation parameters of geodynamic movements in the massif of rocks, the main principles for the selection of safe locations for particularly sensitive subsoil use objects are substantiated and presented.

Keywords: modern geodynamic movements, important subsoil use facilities, nuclear power plant, hierarchically-block massif, self-organization, deformation, geodynamic diagnostics.

The studies were carried out within the framework of the foundation for basic research program No. 136, topic No. 0405-2015-0012.

REFERENCES

- Sashurin A. D. 2010, *Uroven' obespechennosti geodinamicheskoy bezopasnosti ob'yektov atomnoy energetiki* [The level of security of geodynamic safety of nuclear power facilities]. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 12, pp. 214–218.
- Kuzmin Yu. O. 2013, Recent geodynamics of the faults and paradoxes of the rates of deformation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 49, issue 5, pp. 626–642.
- Kuzmin Yu. O. 2016, Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 52, issue 5, pp. 709–722.
- Gulyaev A. N., Druzhinin V. S., Osipova A. Yu. et al. 2008, *Sovremennyye aktivnyye zony narusheniya sploshnosti verkhney chasti zemnoy kory na territorii Yekaterinburg* [Modern active zones of disturbance of continuity of the upper part of the earth's crust on the territory of Ekaterinburg]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], no. 2, pp. 13–16.
- Tagiltsev S. N., Osipova A. Yu., Lukyanov A. E. 2009, *Vydeleniye aktivnykh tektonicheskikh struktur na territorii g. Ekaterinburga* [Extraction of active tectonic structures in the territory of the city of Ekaterinburg]. *Geomechanics in Mining: proceedings of scientific-technical conference (14–15 Oct. 2009)*. Ekaterinburg, pp. 28–36.
- Sashurin A. D. 2011, *Geodinamicheskiye istoki krupneyshikh prirodno-tekhnogennykh katastrof* [Geodynamic sources of the largest natural and man-made disasters]. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 11, pp. 225–236.
- Uchitel I. L. 2010, *Razrushitel'nyye svoystva geodeformatsiy* [Destructive properties of geodeformations]. Odessa, 222 p.
- Selyukov E. I., Stigeeva L. T. 2010, *Kratkiye ocherki prakticheskoy mikrogeodinamiki* [Brief essays of practical microgeodynamics]. Saint-Petersburg, 222 p.
- Serebryakova L. I. 2012, *Otsenka geodinamicheskoy aktivnosti territorii stroitel'stva Krymskoy AES po geodezicheskim dannym* [Assessment of the geodynamic activity of the territory of construction of the Crimean nuclear power plant by geodetic data]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography], no. 6, pp. 46–52.
- Serebryakova L. I. 2012, *Zakonmernosti i osobennosti vertikal'nykh dvizheniy zemnoy poverkhnosti territorii Ignalinskoy AES* [Regularities and features of vertical movements of the earth's surface of the Ignalinskaya Atomic Power Station]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography], no. 7, pp. 57–63.
- Tatarinov V. N. 2000, *Novo-Voronezhskaya AES. GPS-nablyudeniya v rayone AES* [Novo-Voronezhskaya Atomic Power Station. GPS-observations in the area of Atomic Power Station]. Moscow, 12 p.
- Tatarinov V., Seelev I., Tatarinova T. 2017, The results of GNSS observations in the area of the underground disposal of radioactive waste (Yenisei Ridge). *IMCET 2017: New Trends in Mining: Proceedings of 25th International Mining Congress of Turkey 25, New Trends in Mining*, pp. 534–541.
- Konovalova Yu. P. 2011, *Geodinamicheskiye aspekty vybora bezopasnykh ploshchadok razmeshcheniya osobo otvetstvennykh ob'yektov nedropol'zovaniya* [Geodynamic aspects of the choice of safe sites for the placement of particularly critical subsoil use objects]. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 11, pp. 133–138.
- Kenneth M. Cruikshank, Curt D. Peterson. 2015, Current State of Strain in the Central Cascadia Margin Derived from Changes in Distance between GPS Stations. *Open Journal of Earthquake Research*, vol. 4, pp. 23–36.
- Sashurin A. D. 2003, *Sovremennaya geodinamika i tekhnogennyye katastrofy* [Modern geodynamics and technogenic catastrophes]. *Geomechanics in Mining: proceedings of scientific-technical conference (19–21 November 2002)*. Ekaterinburg, pp. 180–191.
- Bos M., Bastos L., Fernandes R. 2010, The influence of seasonal signals on the estimation of the tectonic motion in short continuous GPS time-series. *Journal of Geodynamics*, vol. 49, issue 3–4, pp. 205–209.
- Biessy G., Moreau F., Dauteuil O., Bour O. 2011, Surface deformation of an intraplate area from GPS time series. *Journal of Geodynamics*, vol. 52, issue 1, pp. 24–33.

18. Güral E., Erdoğlan H., Tiryakioğlu I. 2013, Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis. *Digital Signal Processing: A Review Journal*, vol. 23, issue 6, pp. 1945–1957.
19. He X., Hua X., Yu K., Xuan W., Lu T., Zhang W., Chen X. 2015, Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering. *Advances in Space Research*, vol. 55, issue 5, pp. 1316–1327.
20. He X., Montillet J.-P., Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W. 2017, Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*, vol. 106, pp. 12–29.
21. Panzhin A. A. 2003, *Issledovaniye korotkoperiodnykh deformatsiy razlomnykh zon verkhney chasti zemnoy kory s primeneniym sistem sputnikovoy geodezii* [Investigation of short-period deformations of the fault zones of the upper part of the earth's crust with the use of satellite geodesy systems]. *Markshedyeriya i nedropol'zovaniye* [Mine surveying and subsurface use], no. 2, pp. 43–54.
22. Konovalova Yu. P. 2010, *Issledovaniye tsiklichnykh korotkoperiodnykh geodinamicheskikh deformatsiy territoriy pri vybore ploshchadki pod stroitel'stvo atomnykh stantsiy* [Investigation of cyclic short-period geodynamic deformations of territories when choosing a site for the construction of nuclear plants]. *Gornyye Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 7, pp. 269–274.
23. Pustuev A. L. 2011, *Issledovaniye trendovykh geodinamicheskikh deformatsiy pri vybore ploshchadok dlya stroitel'stva atomnykh stantsiy* [Investigation of trend geodynamic deformations in the selection of sites for the construction of nuclear power plants]. *Gornyye Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 1, pp. 282–290.

The article was received on May 7, 2018