

КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ КАК ОСНОВА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МАССИВОВ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ю.А. Кашников¹, В.В. Мусихин¹, В.Г. Букин¹, С.В. Гришко¹, Н.А. Анохин¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия, e-mail: Geotech@pstu.ru

Аннотация: В механике горных пород наиболее информативными параметрами, характеризующими напряженно-деформированное состояние горного массива и земной поверхности, являются результаты инструментальных наблюдений за движением земной поверхности и массива пород вокруг горных выработок. В настоящее время помимо наиболее часто используемых традиционных методов, таких как нивелирование реперов и измерение расстояний между ними для последующего определения вертикальных и горизонтальных деформаций, стали применять методы, основанные на использовании спутниковых технологий, такие как GPS-наблюдения и наблюдения с использованием радарной интерферометрии. На примере Астраханского газоконденсатного месторождения, Яковлевского железорудного месторождения и участка Верхнекамского калийного месторождения, которое разрабатывает ООО «Еврохим-УКК», приводятся конкретные решения задач геомеханики специалистами Центра геомеханики и геодинамики недр ПНИПУ при разработке как рудных и калийных месторождений, так и месторождений углеводородов.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения, инструментальные наблюдения, оседания, сдвигения, подработка, деформированное состояние, геомеханика, геодинамика.

Для цитирования: Кашников Ю. А., Мусихин В. В., Букин В. Г., Гришко С. В., Анохин Н. А. Комплексный мониторинг как основа для моделирования деформационных процессов массивов пород месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 5. – С. 139–154. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_139.

Comprehensive monitoring as a basis for modeling the deformation processes of rock formations of deposits

Yu.A. Kashnikov¹, V.V. Musikhin¹, V.G. Bukin¹, S.V. Grishko¹, N.A. Anokhin¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: Geotech@pstu.ru

Abstract: In rock mechanics, the most informative parameters characterizing the stress-strain state of a mountain range and the Earth's surface are the results of instrumental observations of the displacement of the earth's surface and the rock mass around the mine workings. Currently, in addition to the most commonly used traditional methods, such as leveling reference points and measuring distances between them for the subsequent determination of vertical and horizontal deformations, methods based on the use of satellite technologies, such as GPS observations and observations based on the use of radar interferometry, have begun to be used. Using the example of the Astrakhan gas condensate field, the Yakovlevsky iron ore deposit and the Verkhnekamskoye potash deposit, which is being developed by Eurochem-UKK LLC, the article provides specific examples related to the solution of these issues by specialists of the PNRPU Center for Geomechanics and Geodynamics in solving geomechanics problems both in the development of ore and potash deposits, and in development of hydrocarbon deposits.

Key words: satellite observations, instrumental observations, subsidence, displacement, undercutting, deformed state, geomechanics, geodynamics.

For citation: Kashnikov Yu. A., Musikhin V. V., Bukin V. G., Grishko S. V., Anokhin N. A. Comprehensive monitoring as a basis for modeling the deformation processes of rock formations of deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(5):140-154. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_140.

Введение

Специалисты, решающие проблемы, касающиеся освоения недр, и создающие геомеханическую модель, сталкиваются с затруднением, связанными с тем, что именно взять за соответствие модели натуре. В связи с этим воспользуемся определением модели, представленным в монографии профессора Н.С. Булычева: «Под моделью понимается мысленно представляемая или материально реализуемая система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его так, что ее изучение дает новую информацию об этом объекте» [1]. При этом очевидным требованием к модели является ее подобие натуре.

В механике горных пород при тестировании модели на ее подобие натуре прежде всего оценивается ее соответствие результатам инструментальных наблюдений за деформированием реперов вокруг подземной горной выработки. В случае моделирования деформацион-

ных процессов больших подрабатываемых горных массивов используются результаты маркшейдерско-геодезических инструментальных и спутниковых наблюдений за сдвижением горных пород и земной поверхности, так как данные параметры являются наиболее информативными [2 – 4]. То есть рассчитанные в результате использования какой-либо численной (аналитической) модели сдвижения и деформации должны соответствовать замеренным [5, 6]. При этом возникают следующие вопросы:

- с какой точностью и периодичностью должны выполняться инструментальные наблюдения?
- насколько эффективно спутниковые методы мониторинга могут заменить традиционные методы, основанные на нивелировании и измерении расстояний между реперами?

С этими проблемами при решении задач геомеханики постоянно сталкиваются специалисты Центра геомеханики и геодинамики недр ПНИПУ, которые

имеют весьма большой опыт — как мониторинга деформационных процессов, так и расчетов НДС горных пород. На рис. 1 представлена география научно-технических работ Центра за последние 15 лет. Заказчиками работ Центра являются все ведущие дочерние ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «РОСНЕФТЬ», ПАО «ГАЗПРОМ», ОАО «Сургутнефтегаз», а также такие горнодобывающие предприятия, как ПАО «Уралкалий», ООО «Еврохим-УКК», ООО «Яковлевский ГОК» и др. Мониторинг деформационных процессов на предприятиях как нефтегазового, так и горнодобывающего секторов экономики связан с решением обозначенных выше вопросов. При этом от качества выполненных мониторинговых работ в значительной степени зависит действенность производственных мероприятий и решений, связан-

ных не только с эффективностью, но и с безопасностью горных работ [7 – 9].

Точность и периодичность инструментальных наблюдений

Отметим, что в силу многогранности данной проблемы ни один нормативный документ не дает ее полное и надежное решение. Известные нормативные документы, регламентирующие данный вид работ при разработке месторождений твердых полезных ископаемых и углеводородного сырья, как правило, уже устарели и не соответствуют реалиям сегодняшнего и, тем более, даже ближайшего будущего развития науки.

Традиционные маркшейдерско-геодезические наблюдения предусматривают, прежде всего, нивелирование по реперам наблюдательной станции. При этом инструкции по наблюдениям твер-



Рис. 1. География научно-технических работ Центра геомеханики и геодинамики недр ПНИПУ за последние 15 лет

Fig. 1. Geography of scientific and technical work of the PNRPU Center for Geomechanics and Geodynamics of the Subsoil over the past 15 years

дых полезных ископаемых регламентируют, как правило, нивелирование по методике IV класса. Опыт показывает, что такой точности вполне достаточно для решения вопросов, связанных с охраной сооружений и объектов от подработки, однако она не вполне гарантирует выявление отдельных особенностей развития деформационных процессов, связанных с их дискретностью. Тем более что современные средства измерений обеспечивают существенно большую точность при незначительном увеличении временных и финансовых затрат. В связи с этим даже при разработке месторождений твердых полезных ископаемых в последнее время используют нивелирование III и даже II классов.

При разработке месторождений углеводородного сырья принято применять методику нивелирования II класса с периодичностью наблюдений 1 раз в год, так как огромные площади месторождений обуславливают длины линий до 50 км и более, и, соответственно, предельная ошибка определения оседаний репера даже при использовании II класса может превышать 10 мм и более при максимальных годовых оседаниях 5–10 мм. Если же речь идет о выявлении суперинтенсивных деформаций земной поверхности, приуроченных к контактам блоковых структур, то использование нивелирования II класса является обязательным [10].

На рис. 2 представлен геодинамический полигон на Астраханском газоконденсатном месторождении (АГКМ). Продуктивные объекты мощностью 80–90 м месторождения залегают на глубине 3800 м. За 20 лет наблюдений максимальные оседания достигли 120 мм, т.е. скорость оседаний составляет 6–7 мм/год. Очевидно, что такие оседания можно надежно зафиксировать, используя только нивелирование II класса, использование которого дает максималь-

ную ошибку оседания репера на данном месторождении 5–6 мм.

Зачем фиксировать оседания 6–7 мм/год, которые не приведут к нарушению нормальной эксплуатации поверхностных объектов газодобычи и газодобывающих скважин? На поверхности месторождения в зоне оседаний расположен газоперерабатывающий завод, технологические объекты которого чрезвычайно чувствительны даже к незначительным проявлениям деформационных процессов земной поверхности. Кроме того, зафиксированы техногенные сейсмические явления, связанные с добычей газа. Причем эти явления связаны с поднятиями земной поверхности на уровне 5–10 мм. Отметим, что требования Приложения 2, табл. 12 Приказа Ростехнадзора от 19.05.2023 № 186 «Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности», которые однозначно регламентируют определение вертикальных деформаций подрабатываемых объектов с точностью не ниже ± 10 мм, а для некоторых сооружений не ниже ± 1 мм, являются вполне оправданными.

Все это обуславливает необходимость нивелирования по методике II класса, выполнения высокоточных GPS-наблюдений, радарного космического мониторинга и сейсмологического мониторинга при помощи 6 станций (используются сейсмоприемники СПВ-ЗК, VE-53 и TC20 и регистраторы GMSplus и Дельта-03).

В целом, вопрос обеспечения необходимой точности наблюдений становится на сегодняшний день не самой актуальной проблемой. Как уже было отмечено, современные средства измерений обеспечивают высокую точность при незначительном увеличении временных и финансовых затрат, в связи с чем исследователи и производственники приобретают современное аппарат-

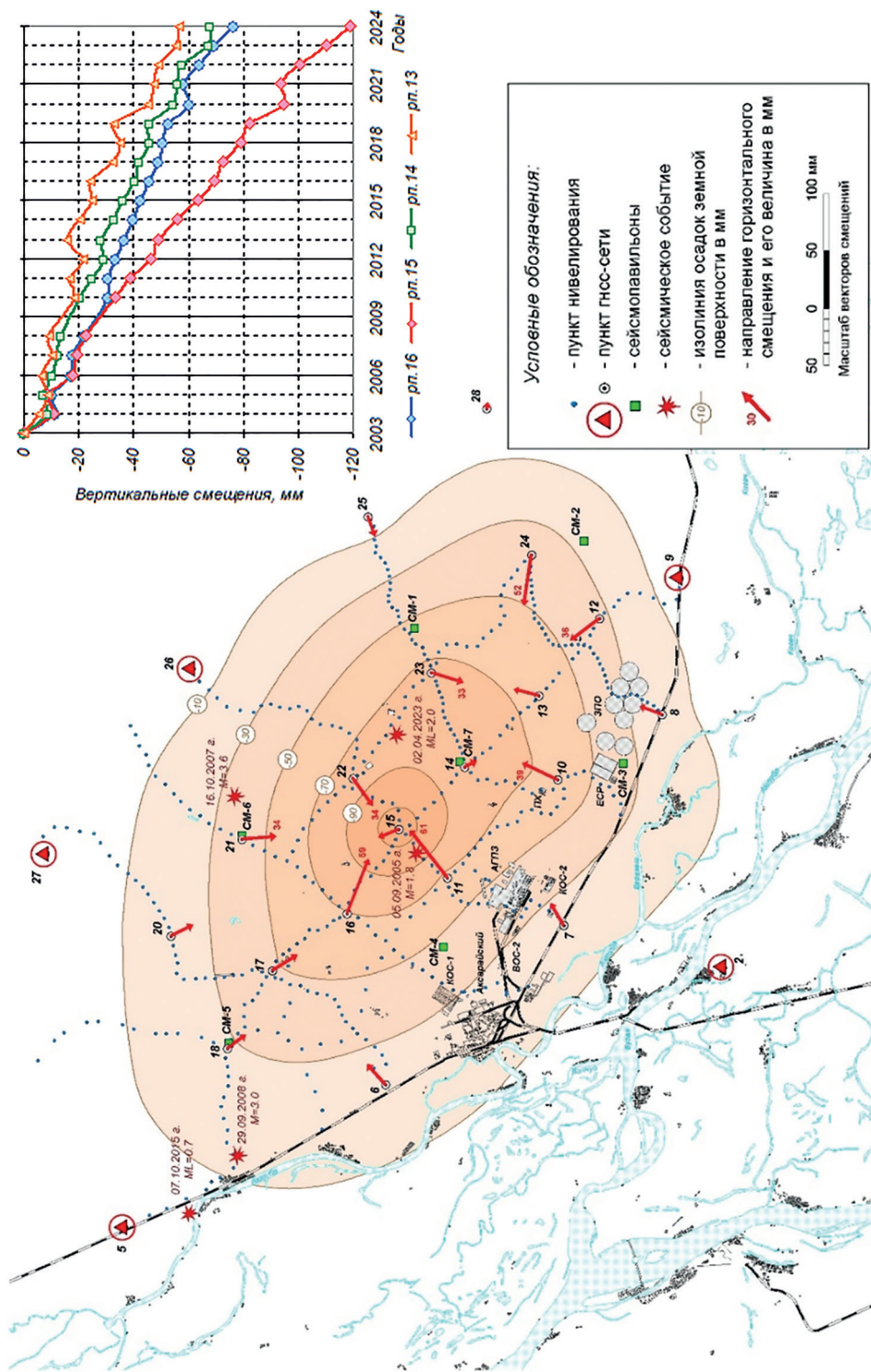


Рис. 2. Астраханский геодинамический полигон: мулда оседаний земной поверхности за 20 лет наблюдений
 Fig. 2. Astrakhan geodynamic polygon: the subsidence of the Earth's surface over 20 years of observations

но-программное обеспечение, которое гарантирует заведомо высокую точность получения результата.

Однако актуальной проблемой становится обеспечение качества выполняемых работ. В современных экономических условиях большинство работ выполняется на тендерной основе, и складывается ситуация, когда в целях минимизации затрат предприятие отдает сложные маркшейдерско-геодезические наблюдения подрядчику, который дал более низкую цену, но его техническая оснащенность, опыт выполнения работ и кадровый состав оставляют желать лучшего. Более того, через 2–3 года эти работы выполняет уже другая организация, и в конечном счете можно наблюдать крайне некачественные результаты многолетних наблюдений. Такой факт имеет место при выполнении работ на геодинамических полигонах на месторождениях углеводородного сырья.

Следует отметить, что специалисты ПНИПУ уже в течение 20 лет выполняют наблюдения на полигонах нефтяных месторождений, территориально совмещенных с Верхнекамским месторождением калийно-магниевых солей (ВКМКС), на полигоне Астраханского ГКМ, на полигонах ОАО «Сургутнефтегаз», на полигонах ООО «ЛУКОЙЛ–Западная Сибирь». Как результат выбора в течение многих лет одного Исполнителя (Подрядчика), картина деформационных процессов земной поверхности становится весьма надежной.

Существенно более актуальной задачей становится определение периодичности наблюдений. Применительно к мониторингу деформационных процессов земной поверхности при разработке месторождений углеводородов уже принята периодичность наблюдений максимум 1 раз в год. Это обусловлено не только незначительными величинами оседаний, но и весьма большими времен-

ными и финансовыми затратами на проведении даже одной серии наблюдений.

Периодичность наблюдений при разработке месторождений твердых полезных ископаемых подземным способом, как правило, связывают со скоростью развития оседаний и с опасностью для предприятия развития геомеханических процессов. Так, при отработке запасов ВКМКС в условиях опасности возникновения провалов, когда идет лавинообразное нарастание оседаний, нивелирование выполнялось даже один раз в 8–10 дней. В таких ситуациях предприятие использовало дистанционные методы, такие как радарная космическая интерферометрия и лидарная съемка. Отдельным вопросом является точность и периодичность наблюдений за устойчивостью дамб и хвостохранилищ, однако в этих случаях также опираются на скорость развития деформационных процессов [11].

Эффективность замены спутниковыми методами мониторинга традиционных методов, основанных на нивелировании и измерении расстояний между реперами

К спутниковым методам мониторинга следует отнести мониторинг с помощью GPS-технологий и мониторинг с помощью GPS-спутниковой радарной интерферометрии [12–15]. Оба метода в настоящее время широко известны, и нет смысла их детально рассматривать. Несколько отдельно и пока еще сравнительно нечасто используются такие методы, как лазерное сканирование и наземная радарная интерферометрия при наблюдениях за сдвигами земной поверхности на открытых горных работах и мониторинг элементов открытых горных работ и наземных трубопроводов с применением беспилотных летательных аппаратов [16, 17].

Очевидным преимуществом этих двух методов является широта охвата исследуемого участка местности, очевидным недостатком — меньшая, в сравнении с высокоточным нивелированием (например, I класса), точность определения вертикальных сдвижений земной поверхности. К недостаткам также следует отнести невозможность определения горизонтальных деформаций малых участков поверхности, которые актуальны для оценки степени опасности развивающихся деформаций для подрабатываемых объектов, т.е. интервалов длиной 20—30 м, как это регламентируется соответствующими нормативными документами. Эти методы не позволяют выявлять суперинтенсивные деформации, т.е. деформации, приуроченные к контактам выходящих на поверхность блоковых структур [10].

Приведем пример спутниковых наблюдений на Астраханском геодинамическом полигоне. Общий объем полевых измерений составил 61 вектор на 24 пунктах. Качество выполненных полевых наблюдений и камеральных вычислений подтверждается основными критериями контроля спутниковых измерений — были получены фиксированные решения для всех векторов спутниковой сети, сходимости результатов в замкнутых построениях и контрольных сеансах удовлетворяют допустимым значениям. Выполненные работы в 2024 г. характеризуются следующими точностными параметрами:

- абсолютные невязки в замкнутых полигонах находятся в пределах $0 \div 21$ мм, при периметрах фигур от 14,4 до 43,9 км;
- максимальная погрешность определения векторов смещений рабочих пунктов в ПО «LGO Software»: в горизонтальной плоскости ± 9 мм; по высоте ± 15 мм;
- максимальная погрешность определения векторов смещений рабочих

пунктов в ПО «Bernese GPS Software» (Швейцария): в горизонтальной плоскости ± 4 мм; по высоте ± 12 мм. Учитывая, что максимально зарегистрированные величины смещений земной поверхности на наблюдаемом объекте на 2024 г. составляют в горизонтальной плоскости 62 мм и по высоте — 116 мм, полученные показатели точности результатов спутниковых наблюдений достаточны для контроля деформационных процессов и подтверждают результаты нивелирования II класса.

Рис. 2 показывает, что GPS-технологии в данном случае позволяют, пусть точно, но надежно, выявить общую картину оседаний и горизонтальных сдвижений при разработке месторождения. Кроме того, становится очевидным, что при обработке большого количества векторов и больших длин векторов следует использовать специализированное программное обеспечение (ПО).

Использование спутниковых наблюдений становится весьма эффективным при определении устойчивости опорных реперов профильных линий. В качестве примера приведем работы на наблюдательной станции Яковлевского железорудного месторождения. На рис. 3 представлена сеть GPS-наблюдений для привязки опорных реперов наблюдательной станции на земной поверхности при разработке данного месторождения и, в качестве примера, показаны векторы для привязки опорного репера линии по простиранию месторождения.

Максимальные оседания за 15 лет разработки первоочередного участка месторождения достигли уже 3,5 м при проектных 0,6 м [6, 7]. Для мониторинга деформаций земной поверхности специалисты ПНИПУ используют методике нивелирования III класса, измерение длин линий с точностью $1/10\ 000$ — $1/15\ 000$ и радарную космическую интерферометрию. Для определения устой-

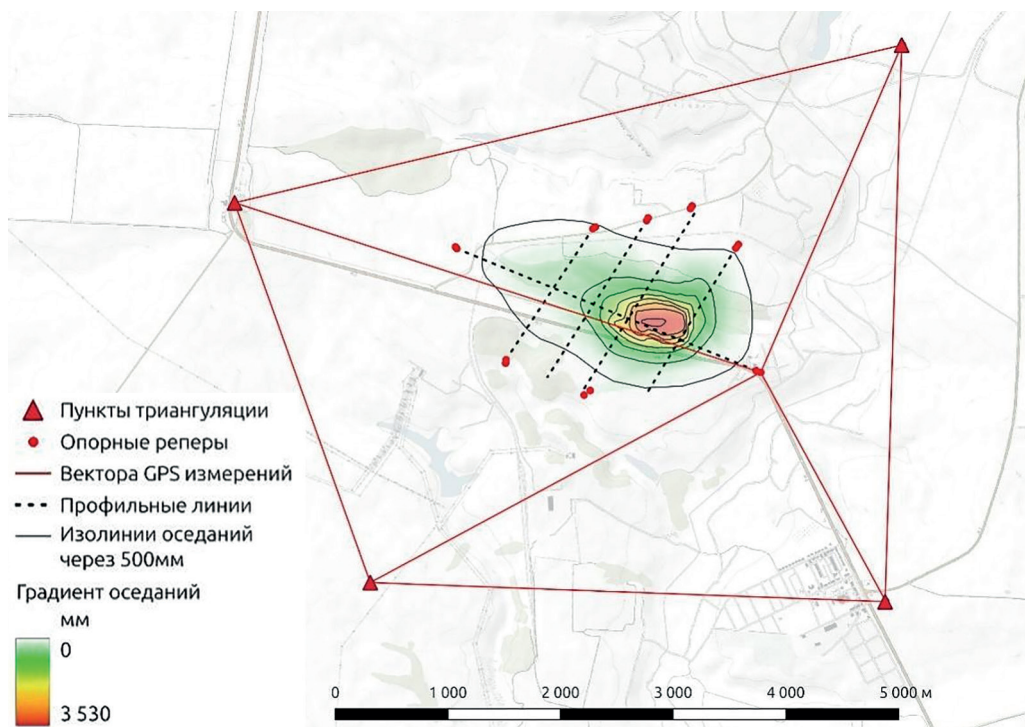


Рис. 3. Расположение пунктов ГГС для GPS-привязки опорных реперов наблюдательной станции Яковлевского рудника

Fig. 3. Location of GGS points for GPS-anchoring reference points of the Yakovlevsky mine observation station

чивости опорных реперов сети были использованы GPS-наблюдения.

Измерения выполнялись шестью ГНСС-приемниками Leica Viva с набором данных в течение 2 ч для векторов между пунктами государственной геодезической сети (ГГС) и в течение 1 ч для опорных пунктов геополигона. Для выполнения независимых измерений координат на определяемые пункты наблюдения проводились в течение трех дней с пересечением на пунктах. Априорная плановая точность центрирования составляла 1 мм. Точность измерения высоты прибора составляла 1 мм.

Обработка результатов измерений выполнялась в программном продукте Leica Geo Office. Расчет относительных координат производился от одного из пунктов триангуляции. Финальное уравнение осуществлялось свободно, т.е.

без жестких закреплений координат исходных пунктов. Полученные координаты опорных пунктов сети полигона имеют навигационную точность абсолютного положения (до 1 м) и высокую относительную погрешность положения в плане $\pm 2,6$ мм и по высоте $\pm 4,2$ мм. Очевидно, что такой точности более чем достаточно для последующего определения от опорных реперов оседаний и горизонтальных смещений рабочих реперов.

Определение вертикальных смещений земной поверхности методом радарной космической интерферометрии коллектив ПНИПУ выполняет уже на протяжении 17 лет. Для этого используется лицензионное ПО «Gamma» (Швейцария). В качестве примера использования данного метода и возникающих при этом проблем рассмотрим резуль-

таты работ на полигоне Яковлевского месторождения. На территории месторождения производятся циклы нивелирования III класса. Очевидно, что без данных традиционных измерений определить эффективность и точность метода радарной интерферометрии в принципе не представляется возможным.

В качестве исходных данных дистанционного зондирования района работ на обозначенных объектах в различные годы использовались данные повторных наблюдений со спутников ENVISAT, Terra-SAR и, в последние годы, Sentinel-1 [18, 19]. Использование каждый раз двух спутников давало положительный результат. Точность интерферометрического анализа оценивалась стандартным

отклонением значений оседаний интерферограмм при отыскании среднего значения в интервалах. Для 2019–2021 гг. среднеквадратическая погрешность определения среднегодовых карт вертикальных смещений на Яковлевском месторождении составила примерно 1,6 мм. Данная величина характеризует внутреннюю сходимость метода радарной интерферометрии.

Таким образом, использование двух спутников позволяет получить приемлемую точность, однако в 2021 г. один из спутников был нарушен, что сказалось на точности получаемых величин оседаний. В 2022–2023 и в 2023–2024 гг. использовались данные только одного спутника Sentinel-1a в количестве 40 сцен.

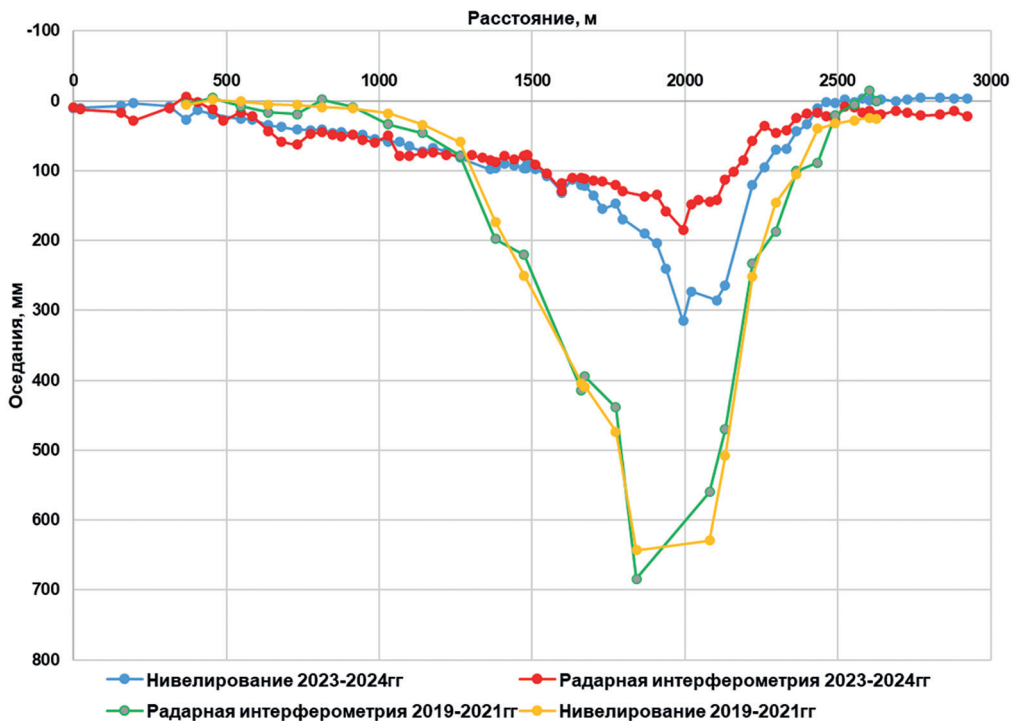


Рис. 4. График сопоставления определения оседаний методом нивелирования и методом радарной интерферометрии по профилю линии по простиранию Яковлевского рудника за период 2019–2021 гг. (спутники Sentinel-1a и Sentinel-1b) и за период 2023–2024 гг. (один спутник Sentinel-1a)

Fig. 4. Graph of the comparison of sedimentation determination by leveling and radar interferometry along the profile line along the strike of the Yakovlevsky mine for the period 2019–2021 (Sentinel-1a and Sentinel-1b satellites) and for the period 2023–2024 (one Sentinel-1a satellite)

На рис. 4 представлены оседания по центральной линии месторождения, полученные традиционным методом нивелирования III класса и методом радарной интерферометрии с использованием двух спутников (Sentinel-1a и Sentinel-1b), а также одного спутника Sentinel-1a. Можно видеть, что в случае оперирования данными только с одного спутника получаемая картина оседаний не вполне соответствует оседаниям, полученным нивелированием, так как при использовании измерений только с одного направления (одного спутника) результат включает сумму оседаний и горизонтальных сдвижений. Кроме того, использование радарной интерферометрии на основе коммерческой радиолокационной космической съемки в условиях высокой стоимости доллара (евро) по отношению к отечественной валюте становится весьма затратным методом, зачастую превышающим по стоимости традиционное нивелирование. При этом критерием соответствия данных радарной интерферометрии реальным параметрам оседаний земной поверхности являются только результаты высокоточного нивелирования.

Таким образом, использование метода радарной космической интерферометрии вместо традиционного метода нивелирования в условиях работы одного спутника не позволяет разделить вектор абсолютных смещений на оседания и горизонтальные сдвижения. В то же время наличие информации с двух спутников дает возможность отслеживать процессы оседаний больших участков земной поверхности с достаточно высокой для практики точностью и с периодичностью в бесснежный период практически раз в две недели.

Именно в таком аспекте работают специалисты ПНИПУ при мониторинге объектов «Казцинк» (Республика Казахстан).

Представим пример комплексного маркшейдерско-геодезического и спутникового мониторинга деформационных процессов земной поверхности на одном из участков ВКМКС. В настоящее время на территории ВКМКС разрабатывается всего одно месторождение нефти, расположенное непосредственно под промышленными запасами калия — месторождение им. Архангельского. Существующий нормативный документ запрещает разработку нефтяных месторождений нефти под промышленными запасами калия. Однако благодаря усилиям ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» при научной проработке вопроса со стороны специалистов Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) данное месторождение было введено в эксплуатацию. В основе работ специалистов ПНИПУ лежало, прежде всего, геомеханическое обоснование возможности добычи нефти с обоснованием отсутствия какого-либо ущерба для продуктивных пластов ВКМКС и действующего предприятия по добыче калия — ООО «Еврохим-УКК».

Как результат этой работы месторождение им. Архангельского пятью скважинами было введено в разработку. Однако, согласно действующему документу, под каждую скважину был оставлен предохранительный целик радиусом 500 м. Назначение этой меры охраны — не допустить прорыва вод из обводненных горизонтов, залегающих над водозащитной толщей (ВЗТ) по контакту «крепь скважины–горные породы» в выработанное пространство рудника.

Очевидно, что ведение горных работ в районе расположения нефтяной скважины может нарушить также ее нормальную эксплуатацию. Ввиду отсутствия данных по допустимым и предельным деформациям стволов нефтяных скважин в качестве предельных и допустимых деформаций приняты значения, получен-

ные для типовой конструкции скважины, строящейся на территории ВКМКС:

- в качестве допустимых и предельных деформаций сжатия горного массива, возникающих в зоне опорного давления, следует принять величины соответственно 1,0 мм/м и 2,0 мм/м. Их превышение приведет к нарушению сохранности цементного кольца;

- в качестве допустимых деформаций сдвига по контактам слоев определены величины 1,5–2,0 мм/м, в качестве предельных 3,0–4,0 мм/м. При достижении вышеприведенных допустимых значений возможны незначительные нарушения цементного кольца, которые не приведут к нарушению в целом конструкции скважины. При достижении

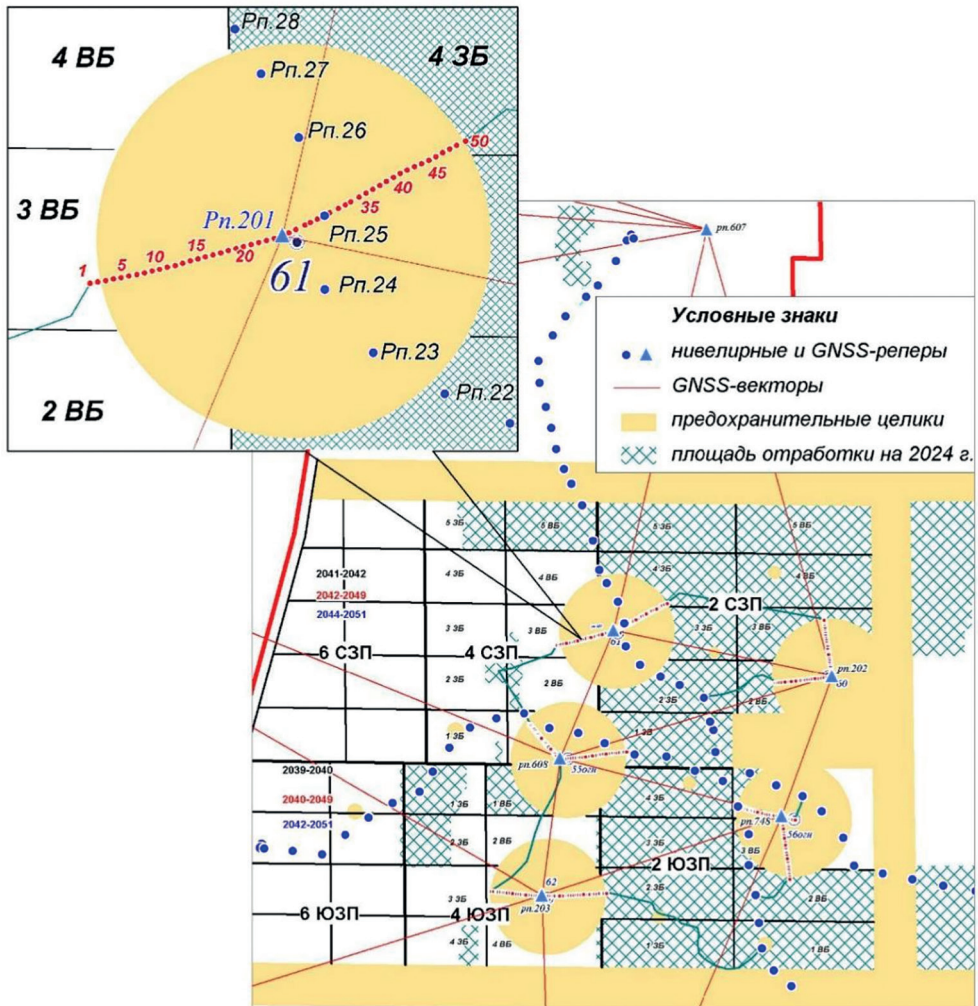


Рис. 5. Схема станции наблюдения за сдвижением земной поверхности в районе предохранительных целиков под нефтяные скважины на месторождении нефти им. Архангельского; детальный план реперов в районе целика под скв. № 61

Fig. 5. Diagram of an observation station for the movement of the Earth's surface in the area of safety pillars for oil wells at the oil field named after Arkhangelsky and a detailed plan of the reference points in the area of the rear sight under Square No. 61

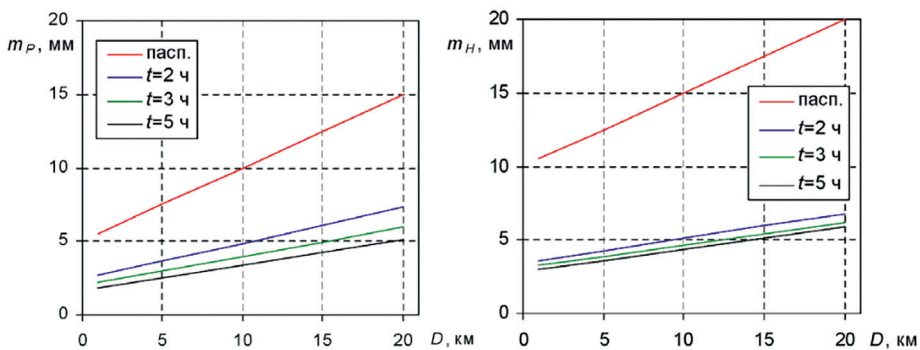


Рис. 6. Точность измерения векторов с разной продолжительностью наблюдений в сравнении с паспортными величинами применяемой ГНСС-аппаратуры

Fig. 6. Accuracy of measurement of vectors with different duration of observations in comparison with the standard values of the used GNSS equipment

предельных значений возможно полное разрушение конструкции скважины на контакте с глинистым прослойком.

Ранее выполненные специалистами ПНИПУ исследования показывают, что даже при радиусе целика 300 м оседания земной поверхности в районе устья скважины не превысят 20 мм, а напряжения, возникающие по стволу скважины и в зоне опорного давления, не приведут к отрыву крепи скважины от массива пород и, тем более, к нарушению конструкции скважины. Однако руководство горнодобывающего предприятия остановилось на величине радиуса целика 500 м.

Для контроля развивающихся деформаций земной поверхности в районе предохранительных целиков ПНИПУ была создана специальная сеть наблюдений по реперам, включающая нивелирование II класса, измерение горизонтальных деформаций в районе целиков с точностью 1/10000 – 1/15000, GPS-мониторинг оседаний и смещений реперов в районе устья скважин (рис. 5). Назначение сети – мониторинг деформаций земной поверхности, вызванных добычей как нефти, так и калия, не только в пределах месторождения нефти и калия, но и, прежде всего, в пределах предохранительных целиков под нефтяные скважины.

Реперы для GPS-наблюдений находятся рядом с устьем скважин и предназначены для определения вектора горизонтального сдвижения, который проектируется на профильную линию и является исходным для дальнейших определений горизонтальных сдвижений. Оседания реперов в районе устья скважины определяются из общей сети нивелирования. На рис. 6 показана точность измерения векторов с разной продолжительностью наблюдений в сравнении с паспортными величинами применяемой ГНСС-аппаратуры. Результаты расчетов плановой m_p и высотной m_H погрешностей вектора в геодезических сетях с разной продолжительностью сеансов спутниковых наблюдений ($t = 2; 3$ и 5 ч) в сравнении с паспортной точностью применяемых приемников (Leica GX1230 GG) в режиме «статика» показывают, что фактическая точность при увеличении времени измерений до 2 – 5 ч более чем вдвое увеличивает паспортную точность измерений. Так, при длине вектора 10 км и времени наблюдения 3 ч погрешность определения положения репера в плане составляет 4 мм, по высоте 6 мм, что сопоставимо с точностью нивелирования II класса [20].

Отметим, что по итогам пятилетних наблюдений оседания поверхности в

районе устьев скважин находятся в пределах 3–5 мм, т.е. практически не превысили точность наблюдений.

Обсуждение результатов

Традиционные маркшейдерско-геодезические методы мониторинга деформационных процессов земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых на сегодняшний день являются самыми точными и детальными методами, которые могут выполняться в любых условиях. Отмечая важность и перспективность методов спутникового мониторинга (GPS-наблюдения, космическая радарная интерферометрия), следует остановиться на том, что данные методы должны быть дополнением к традиционным.

Особое преимущество имеют GPS-наблюдения при выполнении работ по привязке опорных реперов и при мониторинге отдельных удаленных точек поверхности. Результаты расчетов плановой m_p и высотной m_H погрешностей вектора с разной продолжительностью сеансов спутниковых наблюдений в сравнении с паспортной точностью применяемых приемников (Leica GX1230 GG) в режиме «статика» показывают, что фактическая точность при увеличении времени измерений до 2–5 ч более чем вдвое увеличивает паспортную точность измерений и становится сопоставимой с точностью нивелирования II класса при длинах векторов свыше 10 км.

Представляется необоснованным как с точки зрения экономической эффективности, так и с точки зрения точности использование метода радарной интерферометрии. Данный метод не имеет на сегодняшний день ни одной инструкции федерального уровня и во всем мире признан всего лишь дополнением к традиционному высокоточному нивелированию. Более того, данный метод более дорогой, чем нивелирование II класса,

если приобретать коммерческие снимки TerraSar-X или CosmoSkyMed, дающие точность разрешения 1–3 м и наиболее пригодные для определения действительных оседаний поверхности. Использование бесплатных данных КА Sentinel, дающих разрешение 15 м, предоставляет не более чем приблизительную информацию о развитии деформационных процессов. Однако метод радарной интерферометрии быстро развивается, и, с запуском отечественных спутников, имеет весьма большие перспективы.

Заключение

Приведенные примеры показывают, что в каждой конкретной горно-технической и геологической ситуации требуется разработка индивидуальных проектов мониторинга деформационных процессов горного массива и земной поверхности. Особенно это касается ситуаций, связанных с безопасностью людей и безопасной эксплуатацией месторождения в целом. Проектирование наблюдений за устойчивостью такого рода объектов является нетривиальной задачей, несмотря на существенный прогресс в характеристиках маркшейдерско-геодезического оборудования и разнообразный арсенал доступных методов определения смещений. Однако если целью мониторинговых работ является решение вопросов охраны сооружений и объектов от подработки, выявления деформаций, приуроченных к контактам блоковых структур, то приоритет отдается традиционным маркшейдерско-геодезическим методам.

Если же целью мониторинговых работ является решение вопросов общего понимания развития деформационных процессов в пределах горного отвода (и даже за его пределами) месторождения, то большую информацию могут дать современные методы спутниковых наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1982. — 270 с.
2. Волохов Е. М., Кожухарова В. К., Зеленцов С. Н., Мукминова Д. З., Исаев А. А. Оценка эффектов взаимодействия фундамента и основания методами численного моделирования для условий подработки здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге // Записки Горного института. — 2025. — Т. 276. — Вып. 1. — С. 16–29.
3. Jaeger G. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Fundamentals of Rock Mechanics, 4th Edition. Blackwell Publishing, 2017. 488 p.
4. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — М.: Недра, 1989. — 332 с.
5. Сашурин А. Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии. — Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1999. — 268 с.
6. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г., Голубничий Д. В., Гилязев Д. Х. Деформационные процессы массива горных пород при отработке Яковлевского месторождения // Горный журнал. — 2025. — № 10. — С. 28–34.
7. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г., Шустов Д. В. Комплексные геомеханические проблемы при освоении недр // Горный журнал. — 2025. — № 3. — С. 11–18. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.02.
8. Kratzsch H. Bergschadenkunde. Springer Verlag. 2012, 594 p.
9. Панжин А. А., Панжина Н. А. Исследование сдвижений и деформаций земной поверхности на месторождении «Алмаз–Жемчужина» геодезическими методами // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2024. — № 2. — С. 110–119. DOI: 10.15372/FTPRI20240209.
10. Кузьмин Ю. О., Жуков В. С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. — 262 с.
11. Gordeev V., Bannikov A., Davaabayar P. A modern view on the organization of high-precision stability observations of hydraulic structures on the example of monitoring the tailings dam stability of Erdenet Mining Corporation / Proceedings of XV International ISM Congress. 2019, vol. 1, pp. 79–84.
12. Babaryka A., Benndorf J. New subsidence prediction method incorporating asymmetry and shape flexibility: A study case of salt caverns in North Germany // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2025, vol. 58, pp. 8737–8751. DOI: 10.1007/s00603-025-04444-5.
13. Adam N., Reulke R., Spreckels V. Neues Normungsverfahren «InSAR – Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung» / Wissenschaftlich Technische Jahrestagung der DGPF, 2020, Stuttgart, Publikationen der DGPF. 2020, Band 29, pp. 197–204.
14. Spreckels V., Engel Th. Set-up and application of multisensor-referencestations (MSST) for levelling, GNSS and InSAR in the former mining regions Saarland and Ruhrgebiet within Germany / Proceedings of 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 2022, Valencia, Spain.
15. Przyłucka M, Kowalski Z, Perski Z. Twenty years of coal mining-induced subsidence in the Upper Silesia in Poland identified using InSAR // International Journal of Coal Science & Technology. 2022, vol. 9, no. 1, article 86. DOI: 10.1007/s40789-022-00541-w.
16. Величко И. М. Сравнение лазерного сканирования и радарной интерферометрии при наблюдении за сдвигениями земной поверхности на открытых горных работах // Маркшейдерия и недропользование. — 2025. — № 3. — С. 10–15. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-3-10-15.
17. Левитин Р. Е., Аксенов С. Е., Ульянов Н. С., Терешонок А. П. Геодезический мониторинг деформаций надземных трубопроводов при использовании беспилотных летательных аппаратов в труднодоступных арктических районах // Маркшейдерия и недропользование. — 2024. — № 5. — С. 114–119. DOI: 10.56195/20793332_2024_5_114_119.
18. Тютюкова В. А., Голубничий Д. В., Гилязев Д. Х. Определение оседаний земной поверхности по результатам совместной интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования Земли со спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b // Маркшейдерия и недропользование. — 2023. — № 2(124). — С. 69–75.
19. Тютюкова В. А. Определение горизонтальных сдвижений с применением интерферометрической обработки данных дистанционного зондирования со спутников Sentinel-1 с двух орбит // Геодезия и картография. — 2024. — Т. 85. — № 9. — С. 57–64.

20. Гришко С. В. Влияние продолжительности наблюдений на точность результатов спутниковых измерений // Геодезия и картография. — 2017. — № 3. — С. 7 — 13. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-921-3-7-13. **ГИАС**

REFERENCES

1. Bulychev N. S. *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy* [Mechanics of underground structures], Moscow, Nedra, 1982, 270 p.
2. Volohov E. M., Kozhukharova V. K., Zelentsov S. N., Mukminova D. Z., Isaev A. A. Assessment of interaction effects between the foundation and the base using numerical simulation methods for conditions of undermining the Mariinskii Theatre building in Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 276, iss. 1, pp. 16 — 29. [In Russ].
3. Jaeger G. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th Edition. Blackwell Publishing, 2017. 488 p.
4. Turchaninov I. A., Iofis M. A., Kaspar'yan E. V. *Osnovy mekhaniki gornykh porod* [Fundamentals of rock mechanics], Moscow, Nedra, 1989, 332 p.
5. Sashurin A. D. *Sdvizhenie gornykh porod na rudnikakh chernoy metallurgii* [Shifting of rocks in the mines of ferrous metallurgy], Ekaterinburg, 1999, 268 p.
6. Kashnikov Yu. A., Ashikhmin S. G., Golubnichiy D. V., Gilyazev D. Kh. Deformation processes in rock mass during mining of the Yakovlevskoe deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 10, pp. 28 — 34. [In Russ].
7. Kashnikov Yu. A., Ashikhmin S. G., Shustov D. V. Complex problems of geomechanics in subsoil management. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 3, pp. 11 — 18. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.02.
8. Kratzsch H. *Bergschadenkunde*. Springer Verlag. 2012, 594 p.
9. Panzhin A. A., Panzhina N. A. Ground Surface Movements and Deformations at Almaz-Zhemchuzhina Deposit from Surveying Techniques. *Journal of Mining Sciences*. 2024, no. 2, pp. 110 — 119. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20240209.
10. Kuz'min Yu. O., Zhukov V. S. *Sovremennaya geodinamika i variatsii fizicheskikh svoystv gornykh porod* [Modern geodynamics and variations of physical properties of rocks], Moscow, 2004, 262 p.
11. Gordeev V., Bannikov A., Davaabayar P. A modern view on the organization of high-precision stability observations of hydraulic structures on the example of monitoring the tailings dam stability of Erdenet Mining Corporation. *Proceedings of XV International ISM Congress*. 2019, vol. 1, pp. 79 — 84.
12. Babaryka A., Benndorf J. New subsidence prediction method incorporating asymmetry and shape flexibility: A study case of salt caverns in North Germany. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025, vol. 58, pp. 8737 — 8751. DOI: 10.1007/s00603-025-04444-5.
13. Adam N., Reulke R., Spreckels V. Neues Normungsverfahren «InSAR — Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung». *Wissenschaftlich Technische Jahrestagung der DGPF*, 2020, Stuttgart, Publikationen der DGPF. 2020, Band 29, pp. 197 — 204.
14. Spreckels V., Engel Th. Set-up and application of multisensor-reference stations (MSST) for levelling, GNSS and InSAR in the former mining regions Saarland and Ruhrgebiet within Germany. *Proceedings of 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, 2022, Valencia, Spain.
15. Przyłucka M, Kowalski Z, Perski Z. Twenty years of coal mining-induced subsidence in the Upper Silesia in Poland identified using InSAR. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022, vol. 9, no. 1, article 86. DOI: 10.1007/s40789-022-00541-w.
16. Velichko I. M. Comparison of laser scanning and radar interferometry in observing the movements of the Earth's surface in open-pit mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025, no. 3, pp. 10 — 15. [In Russ]. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-3-10-15.
17. Levitin R. E., Aksenov S. E., Ulyankin N. S., Tereshonok A. P. Geodetic monitoring of deformations of aboveground pipelines when using unmanned aerial vehicles in hard-to-reach Arctic regions. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024, no. 5, pp. 114 — 119. [In Russ]. DOI: 10.56195/20793332_2024_5_114_119.
18. Tyutyukova V. A., Golubnichiy D. V., Gilyazev D. H. Determination of subsidence of the Earth's surface based on the results of joint interferometric processing of data from space radar sensing of

the Earth from Sentinel-1a and Sentinel-1b satellites. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023, no. 2(124), pp. 69–75. [In Russ].

19. Tyutyukova V. A. Determination of horizontal displacements using interferometric processing of remote sensing data from Sentinel-1 satellites from two orbits. *Geodesy and Cartography*. 2024, vol. 85, no. 9, pp. 57–64. [In Russ].

20. Grishko S. V. The impact of duration observations on precision of results GNSS measurements. *Geodesy and Cartography*. 2017, no. 3, pp. 7–13. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-921-3-7-13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кашников Юрий Александрович¹ — д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой,

ORCID ID: 0000-0002-6168-7251,

Мусихин Василий Владимирович¹ — канд. техн. наук,
доцент,

ORCID ID: 0000-0003-3038-2241,

Букин Василий Григорьевич¹ — старший научный сотрудник,

Гришко Сергей Вадимович¹ — старший научный сотрудник,

ORCID ID: 0009-0000-6236-7156,

Анохин Никита Анатольевич¹ — аспирант,

ORCID ID: 0009-0007-8855-2588,

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Для контактов: Кашников Ю.А., e-mail: Geotech@pstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.A. Kashnikov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Head of Chair,

ORCID ID: 0000-0002-6168-7251,

V.V. Musikhin¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

ORCID ID: 0000-0003-3038-2241,

V.G. Bukin¹, Senior Researcher,

S.V. Grishko¹, Senior Researcher,

ORCID ID: 0009-0000-6236-7156,

N.A. Anokhin¹, Graduate Student,

ORCID ID: 0009-0007-8855-2588,

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

Corresponding author: Yu.A. Kashnikov, e-mail: Geotech@pstu.ru.

Получена редакцией 18.12.2025; получена после рецензии 13.02.2026; принята к печати 10.04.2026.

Received by the editors 18.12.2025; received after the review 13.02.2026; accepted for printing 10.04.2026.

