

Восстановление информации об оседаниях массива налегающей толщи и земной поверхности по результатам измерений на развивающемся полигоне Яковлевского месторождения

В. В. Мусихин¹, Н. А. Анохин^{1✉}, Д. Х. Гилязов²

¹ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация

² ООО «Яковлевский горно-обогатительный комбинат», пос. Яковлево, Российская Федерация
✉ nikitaanokhin59@gmail.com

Резюме. Приведены результаты исследований по повышению информативности деформационного мониторинга на развивающемся маркшейдерско-геодезическом полигоне (МГП) Яковлевского месторождения. Выявлено, что непостоянство наблюдательной сети, частичная утрата и последующее восстановление реперов приводят к потере критически важной информации о динамике и максимальных значениях оседаний. Представлен подход к решению этой проблемы, основанный на синтезе имеющихся разрозненных данных наблюдений как на поверхности, так и в массиве. Показано, что метод пространственно-временного моделирования позволяет эффективно восстанавливать недостающие данные, реконструировать поле оседаний и характер развития мульды сдвижения во времени. Проведена оценка геомеханической обстановки на месторождении на основе синтезированных данных. Результаты исследований могут быть полезными при объективной геомеханической оценке состояния массива горных пород и для обеспечения безопасной отработки месторождения в сложных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: оседания массива, репер, маркшейдерско-геодезический полигон, наблюдения за оседаниями, поверхность, скорости оседаний, оседания в шахте, мульда оседаний, деформационный мониторинг, нивелирование

Благодарности, признательность, финансирование: Выражаем благодарность научному руководителю работ профессору Юрию Александровичу Кашникову за критические замечания и ценные рекомендации, а также признательность коллегам инженерно-технического персонала управления гидрогеомеханического мониторинга Яковлевского ГОКа за содействие в выполнении мониторинга.

Для цитирования: Мусихин В.В., Анохин Н.А., Гилязов Д.Х. Восстановление информации об оседаниях массива налегающей толщи и земной поверхности по результатам измерений на развивающемся полигоне Яковлевского месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):90-96. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-90-96>.

Reconstruction of subsidence data for the overlying rock mass and ground surface from measurements on an evolving monitoring network at the Yakovlevskoye deposit

V. V. Musikhin¹, N. A. Anokhin^{1✉}, D. Kh. Gilyazev²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Yakovlevsky Mining and Processing Plant LLC, Yakovlevo, Russian Federation
✉ nikitaanokhin59@gmail.com

Abstract. This paper presents the results of a study on enhancing the information value of deformation monitoring at the developing mine surveying and geodetic network of the Yakovlevskoye deposit. It was found that the instability of the observation network, including the partial loss and subsequent restoration of benchmarks, leads to the loss of crucial information on the dynamics and maximum values of subsidence. An approach to solve this problem is presented, based on the synthesis of available disparate observation data from both the surface and the rock mass. It is shown that the spatio-temporal modeling method allows for the effective

reconstruction of missing data, the subsidence field, and the development pattern of the subsidence trough over time. An assessment of the geomechanical situation at the deposit was performed based on the synthesized data. The research findings can be useful for the objective geomechanical assessment of the rock mass state and for ensuring the safe exploitation of the deposit under complex mining and geological conditions.

Keywords: subsidence, benchmark, mine surveying and geodetic polygon, subsidence monitoring, surface, subsidence rates, in-mine subsidence, subsidence trough, deformation monitoring, leveling

Acknowledgments, funding, financial Support: The authors wish to thank their scientific supervisor, Prof. Yuri A. Kashnikov, for his critical comments and valuable recommendations. They also wish to acknowledge their colleagues from the engineering and technical staff of the Department of Hydro-geomechanical Monitoring at the Yakovlevsky GOK for their assistance in carrying out the monitoring.

For citation: Musikhin V.V., Anokhin N.A., Gilyazev D.Kh. Reconstruction of subsidence data for the overlying rock mass and ground surface from measurements on an evolving monitoring network at the Yakovlevskoye deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):90-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-90-96>.

Введение

Отработка богатых железных руд на Яковлевском месторождении производится подземным способом. В качестве основной на Яковлевском руднике принята нисходящая слоевая система разработки с закладкой. Добыча руды на Яковлевском руднике начата в 2007 году с отработки нулевого слоя на глубине 600 м (отметка -370 м) в шести очистных блоках. Очистные работы системой разработки нисходящими слоями с твердеющей закладкой предусматривают отработку запасов руды с опережением верхними слоями нижних [1].

Из-за пустот, возникающих в результате проектной недо-закладки выработок, усадки закладочного материала и наличия незаложенных пустот в кровле нулевого слоя, возникли оседания массива налегающей толщи и земной поверхности, которые достигли в сентябре 2024 года значения в 3,1 м [2]. В этой связи работы по мониторингу оседаний и сдвижений являются необходимыми как для подземной части месторождения, так и для поверхностной [3, 4].

Маркшейдерско-геодезический полигон на Яковлевском месторождении состоит из поверхностного и подземного полигонов. Целью последнего является мониторинг смещения массива в процессе отработки месторождения. На полигонах с регулярной периодичностью и достаточной точностью выполняются геодезические измерения (нивелирование III класса) с целью определения оседаний [5]. Сеть полигонов постоянно развивается: происходит закладка новых реперов в областях расширяющейся зоны влияния горных работ и закладка взамен утраченных реперов в условиях уже идущих деформационных процессов. Реперы в зависимости от места закладки имеют ограниченный жизненный цикл, который в перспективе будет меньше срока отработки месторождения, поэтому со временем реперы нулевого цикла утрачиваются.

С утратой реперов обычно утрачивается информация о скоростях оседаний, и в конечном счете при оценке текущих оседаний исходят из номенклатуры существующих реперов, несмотря на то, что реперы могли быть заложены в условиях уже идущих деформационных процессов [6]. Эта проблема является характерной для подавляющего большинства наблюдательных станций за сдвижением горных пород, так как старые реперы часто нарушаются, а новые закладываются в местах, где уже прошли определенные оседания [7]. В связи с этим идеей работы является синтез скоростей всех существовавших реперов с учетом их планового положения для картографирования мульды оседаний на любой период, включая текущий, и расчет максимальных значений оседаний.

Цель исследований: восстановление истинных величин оседаний и картографирование мульды оседаний в условиях непостоянной номенклатуры реперов на маркшейдерско-геодезическом полигоне Яковлевского месторождения, а также максимальное использование имеющейся информации каждого утраченного и существующего реперов.

Методика исследований

Для анализа были собраны и систематизированы все архивные и текущие данные нивелирования по реперам маркшейдерско-геодезического полигона Яковлевского месторождения.

Для каждого репера, включая утраченные, были рассчитаны средние скорости оседаний за весь период его функционирования.

На основе полученного массива данных о скоростях и плановом положении реперов выполнялась пространственная интерполяция для построения карт мульды оседаний и определения полных накопленных смещений.

Объект исследования: Яковлевское железорудное месторождение.

Предмет исследования: база данных наблюдений МГП на поверхности и в массиве за весь период существования.

Результаты исследований

Текущее состояние маркшейдерско-геодезического полигона на поверхности

База результатов мониторинга маркшейдерско-геодезического полигона на поверхности ЯГОК содержит данные с 2010 года. Дата 01.01.2010 является нулевым циклом и фактически считается началом известных деформационных процессов на поверхности. К текущему моменту имеются результаты 35 серий наблюдений, включающих от одной (2018 г.) до пяти (2014 г.) серий в год, в среднем две серии наблюдений в год.

До данного исследования оценка максимальных оседаний и наклонов каждый цикл основывалась на ограниченном и уменьшающемся перечне реперов, заложенных до 2013 года. [8]. В процессе обустройства территории поверхностных закладочных комплексов и связанного с этим строительства отдельные реперы уничтожаются. К концу 2024 года из 51 репера, заложенного до 2013 года, остался только 41. Среди уничтоженных реперов большая часть находилась в зоне максимальных оседаний, включая репер Rp7 с максимальными накопленными оседаниями к 2023 году.

В связи с этой тенденцией потеря информации о мак-

симальных оседаниях с использованием только реперов до 2013 года с течением времени становилась неизбежной. Кроме того, в условиях ограниченной, разряженной и нерегулярной сети реперов с течением времени картографирование накопленной мульды оседаний становится фрагментарным.

Летом 2023 года в результате реконструкции геополигона было заложено 129 реперов забивного типа (рис. 1) (см. цв. вклейку на стр. 97), которые включены в работу [9]. Однако данные реперы совместно с уже имеющимися позволяли оценивать только современные скорости оседаний и накопленные оседания с 2023 года. В итоге из 244 заложенных реперов с 2010 года в работе для оценки накопленных оседаний использовался 41 репер, а для текущих задач – 219. За все время были утрачены 25 реперов, их скорости не учитывались для последних циклов мониторинга. Сведения о максимальных оседаниях на Rp7 экстраполировались во времени с учетом скоростей за последние четыре цикла.

Моделирование мульды оседаний за весь период наблюдений и пересчет унаследованных оседаний для новых реперов поверхностной наблюдательной станции

Моделирование мульды оседаний за весь период наблюдений и пересчет унаследованных оседаний для новых реперов подразумевает использование всех существовавших и существующих реперов для картографирования мульды оседаний на все серии наблюдений, включая последнюю с начала наблюдений на первых реперах 2010 года.

Моделирование начиналось с построения карты оседаний для реперов первого поколения, заложенных перед первыми наблюдениями 2010 года, на дату закладки реперов второго поколения – 05.2012. Для реперов первого поколения (первой серии) было принято условие, что до 2010 года деформационные процессы отсутствовали. Придание реперам нулевого цикла ненулевых значений оседаний требуют ретроспективного или геомеханического моделирования, что является отдельным научным вопросом [10, 11]. Учитывая также тот факт, что добыча руды на Яковлевском руднике начата в 2007 году, а временной лаг сдвижений, возникающих на поверхности от начала отработки пространства в шахте, занимает три года, то предполагается, что первые деформационные процессы начали возникать в 2010 году. И с учетом незначительных скоростей оседаний первого цикла они не могли достигнуть значимых по сравнению с последующими скоростями значений [2].

Пересчет унаследованных значений оседаний для реперов производился следующим образом. Реперы имеющейся базы данных были ранжированы по дате закладки (по поколению). Всего получилось 16 поколений реперов и соответствующих серий, в которые включались введенные реперы. По реперам первого поколения была построена площадная карта оседаний (грид, с размером ячейки 10 м) методом кубической интерполяции Клафа – Точера в ГИС QGIS [12].

На полученную карту наносились реперы второго поколения. В ячейках грида, занимаемых соответствующими реперами второго поколения, снимались интерполированные значения оседаний. Реперам второго поколения вместо исходного нулевого значения придавалось снятое в соответствующей ячейке грида значение интерполированного оседания. Такие оседания являются унаследованными от реперов предыдущего поколения. Никакие поправки в последующие

оседания, полученные измерениями, далее не вносились (за исключением поправок за повреждения реперов).

При построении карт оседаний помимо участия в построении реперов предыдущего поколения выносились также краевые условные реперы с нулевыми оседаниями в пределах прямоугольника, вписывающего реперы текущего поколения. Это было необходимо для расширения мульды оседаний в пределах существующего прямоугольного контура реперов и экстраполяции оседаний в краевых частях контуров положения реперов, так как новые реперы часто закладывались снаружи описываемого реперами многоугольного контура.

Далее, по реперам первого и второго поколения строилась карта оседаний на дату закладки третьего поколения реперов. Определялись унаследованные значения оседаний для реперов третьего поколения и т. д. Всего было построено 15 карт оседаний.

Таким образом, для реперов 15-го поколения, заложенных в 2023 году в количестве 129 штук, стали доступны начальные оседания (рис. 2) (см. цв. вклейку на стр. 97) со значениями от 0 до 2 709 мм (Rp200). Максимальные значения оседаний репера Rp7, фиксируемые до его уничтожения в 2023 году, как и значения оседаний остальных утраченных реперов, просуществовавших минимум один цикл (две серии), были учтены при построении соответствующих карт накопленных оседаний и сложили в итоге рисунок текущей карты накопленных оседаний.

Правильность проведенного пересчета оседаний подтверждается характером графиков оседаний во времени, теперь большинство графиков ретроспективно экстраполируются в одну начальную точку (прим. 2010 г., рис. 3) (см. цв. вклейку на стр. 98), а также характером профилей мульды оседаний, которые приняли классический вид распределения (рис. 4) (см. цв. вклейку на стр. 98). Максимальное значение оседаний к текущей дате наблюдений составило значение 3 393 мм (для Rp70).

Текущее состояние наблюдательной станции за сдвижением массива пород предохранительного целика

Для обеспечения безопасности отработки запасов Яковлевского месторождения под неосушенными горизонтами был оставлен целик богатых железных руд (БЖР, рудная толочина). Научными исследованиями обоснована возможность отработки на первоочередном участке месторождения одного этажа без предварительного осушения нижнекаменноугольного горизонта. Для этого между зоной ведения очистных работ и водоносным горизонтом был оставлен предохранительный рудный целик мощностью 65 м [13].

В качестве рабочих реперов для мониторинга сдвижений массива целика в шахте используется конструкция, разработанная на Яковлевском руднике, представляющая собой металлический отвес-цилиндр, соединенный тросом с якорем, углубленным в 8-метровую скважину в массив. Реперы в кровле выработок должны размещаться через 30–50 м. При закладке выработки репер перевязывается на новый трос с длиной, достаточной для его выхода на нижний уровень. Новый трос с репером укладывается в вертикальную трубу для защиты от закладочного материала. После отработки нижнего горизонта репер освобождается и продолжает использоваться для наблюдений [14].

База данных результатов мониторинга сдвижений мас-

сива целика в шахте ЯГОК содержит данные с 2007 года. К текущей серии наблюдений имеются результаты 80 серий наблюдений, включающих от одной (2014 г.) до десяти (2008 г.) серий в год, в среднем четыре серии наблюдений в год.

Проблема сохранности реперов в шахте стоит острее, чем на поверхности. Постоянное движение работ по закладке выработок и крепежных работ часто приводит к несогласованной консервации рабочих реперов без мер по их сохранности и, как следствие, к их утрате. В этой связи за все время мониторинга наблюдательный подземный полигон стал представлять собой меняющуюся нерегулярную сеть реперов, в которой почти все современные реперы были заложены намного позже начальной серии, а утраченные существовали всего несколько циклов и были размещены в разных местах по довольно разреженной сетке (рис. 5). Плотность наблюдений в этом случае сильно уступает плотности и полноте наблюдений на поверхности, она недостаточная для определения накопленных оседаний без использования дополнительного моделирования.

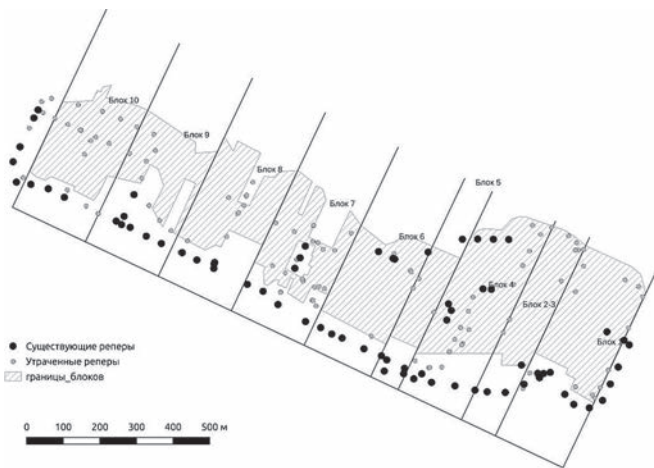


Рис. 5. Современное состояние наблюдательной станции в шахте /
Fig. 5. Current status of the underground monitoring station

Моделирование муьды оседаний за весь период наблюдений для подземной наблюдательной станции при помощи пространственной интерполяции

Моделирование муьды оседаний за весь период наблюдений подразумевает использование всех существовавших и существующих реперов для картографирования муьды оседаний на все года, включая последнюю дату с начала наблюдений на первых реперах 2007 года. Отличие подземного полигона от поверхностного заключается в том, что закладка новых реперов и утрата старых (особенно последнее время) здесь происходят практически перед каждой серией. Поэтому подход к синтезу данных несколько отличался от моделирования на поверхности.

В качестве подготовительных работ перед моделированием база данных анализировалась на выбросы. Так, в процессе эксплуатации возможен повторный монтаж репера, что приводит к скачкообразному изменению высотных отметок. Данные выбросы устранялись введением поправок с учетом тенденций оседаний. Кроме того, для многих реперов существуют окна наблюдений, когда репер не имеет высотной отметки на одном из прошедших циклов наблюдений, а потом вновь включается в работу. В этом случае оседания в окнах заполнялись интерполяцией по времени.

Далее для моделирования делались ежегодные выборки реперов начиная с первой даты наблюдений. Каждая выборка содержала набор реперов, имеющих минимум две серии наблюдений в году с последней даты предшествующего года до последней даты выбираемого. Так как каждый репер чаще имел более одного цикла измерений в году, для репера вычислялись средневзвешенные скорости, где в качестве веса выступал интервал отдельного цикла. Средневзвешенные значения скоростей множились на интервал исследуемого года с последней даты предшествующего года до последней даты выбираемого. Таким образом выборки каждого года содержали средневзвешенные значения накопленных оседаний по всем реперам, участвовавшим в наблюдениях исследуемого года.

Для каждой выборки добавлялись 45 условных краевых реперов с нулевыми значениями оседаний, расположенных на расстоянии 20–30 м от границы отработки для задания краевых ограничений массива.

По каждой выборке строились карты накопленных оседаний (грид, с размером ячейки 10 м) методом линейной интерполяции [15]. Всего было построено 19 карт оседаний с одинаковыми параметрами с 2007 года по текущую дату: 2025 год.

На основе полученных карт в точках с бывшими и существующими реперами снимались интерполированные в пространстве значения оседаний. Максимальное накопленное (суммарное) значение оседаний за все годы составило 2 860 мм, что было ниже, согласно ранее выполненным оценкам по скоростям отдельных реперов значению 3 970 мм. Таким образом, строгое пространственное интерполирование имеющихся реперов показало заниженное суммарное значение оседаний массива. Это говорит о нарушении временного наследования реперами ввиду недостаточно плотной сети мониторинга и разрывов в наблюдениях как в пространстве, так и во времени.

Восстановление тренда оседаний реперов

Пространственная интерполяция позволила получить хоть и заниженные, но не нулевые интерполированные значения для реперов, на которых отсутствуют результаты измерений. На графике (рис. 6) (см. цв. вклейку на стр. 99) показано временное смещение точки в зоне максимальных оседаний репера Rp4-3-19, существовавшего с весны 2024 года оседания, в зоне которого на первом этапе были определены пространственной интерполяцией от соседних реперов.

Но в интервале с 2015 по 2020 год в данной зоне по причине отсутствия рабочих реперов даже интерполированных оседаний почти не было выявлено. В дальнейшем данные подверглись интерполяции во времени.

Идея интерполяции во времени заключалась в замене интервалов с заниженными значениями скоростей оседаний интервалами средних предшествующих интервалу скоростей (за год и более). Для каждой точки рассчитывалась среднегодовая скорость на основе суммарного накопленного значения оседаний за 19 лет. Далее принималось условие: если измеренная скорость в отдельном году ниже порогового отношения от среднегодовой за 19 лет, то такая скорость заменялась средней скоростью предыдущего интервала за четыре предшествующих года (2, 3). Пороговое отношение (коэффициент k_{th}) выбиралось в интервале от 0 до 10.

На рисунке 6 показаны примеры с использованием коэффициента 0,1 (2–5 значения), 0,3, 0,5, 0,9 и 1,5.

Поскольку оседания моделировались в первом случае как тренд скоростей за последние четыре года, к первым четырем годам описанные условия не применялись.

$$k_i = \frac{\Delta h_i}{\Delta h} \quad (1)$$

$$s_{(i+4;...)} = \Delta h_{(i+4;...)}, k_{(i+4;...)} > 0,5. \quad (2)$$

$$s_{(i+4;...)} = \Delta h_{i;i+3}, k_{(i+4;...)} \leq 0,5, \quad (3)$$

где k_i – коэффициент отношения к среднегодовой скорости оседаний;

Δh_i – оседания отдельного годового интервала, мм;

Δh – среднегодовая скорость на основе суммарного накопленного значения оседаний за 19 лет, мм/год;

$s_{(i+4;...)}$ – восстановленное оседание годового интервала, мм;

$\Delta h_{i;i+3}$ – среднее оседание за предыдущие четыре годовых интервала, мм.

Вопрос выбора порогового коэффициента k_{th} исходил из максимально полученных значений (рис. 7) и минимальной среднеквадратичной ошибки отклонения от линейного тренда.

На рисунке 7 показаны значения максимальных оседаний в зависимости от выбранного коэффициента порогового отношения. Установлено, что ближайшее к ожидаемому максимальное значение оседаний (3 986 мм) было получено при коэффициентах 0,5–0,7. Для коэффициента больше 1,0 влияние коротких интенсивных оседаний во времени могло привести к завышению накопленных оседаний в итоге расчета, поэтому коэффициент должен был быть меньше 1,0.

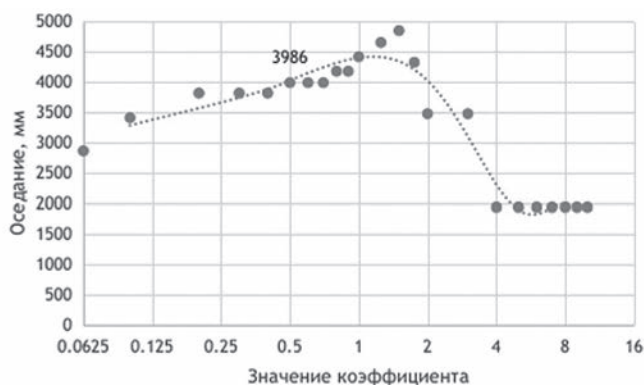


Рис. 7. Значения максимальных оседаний в зависимости от выбранного порогового отношения к среднегодовой скорости оседаний /
Fig. 7. Maximum subsidence values versus the selected threshold coefficient relative to the average annual subsidence rate

Оценка точности основывалась на определении среднеквадратичного отклонения скоростей каждого года от средней за 19 лет. Гистограмма распределения отклонений при коэффициенте 0,5 имела следующие параметры: среднее значение равнялось 1,6 мм, медиана – 1,6 мм, асимметрия – -0,48, эксцесс – 4,1. В плане максимальное среднеквадратичное отклонение было сконцентрировано в репере Rp6-1-4н.

График его оседаний во времени представлен на рисунке 8 (см. цв. вклейку на стр. 99).

Из графика видно, что наблюдения на репере начались в 2019 году. В интервале с середины 2019 года по конец 2020-го по результатам трех серий измерений наблюдались значительные по отношению к последующим скорости оседаний. Данное явление нельзя отнести к грубым ошибкам, так как характер графика не подтверждает ни усадку репера (скорости возросли не с самого начала), ни его закрепление (увеличение скорости подтверждается тремя измерениями), к тому же аналогичное увеличение скоростей по результатам измерений произошло на репере Rp6-1-5н, находящемся в 60 метрах к юго-востоку.

На графике (рис. 8) показаны измеренные значения оседаний репера с 2019 года, смоделированные оседания путем пространственной интерполяции до его закладки (интерполированные), и смоделированные оседания с учетом восстановленного тренда при разных пороговых коэффициентах. Из графика рисунка 8 видно, что коэффициент 0,93 приводит к завышению оседаний выше измеренных после скачка оседаний в 2019–2020 годах. При коэффициенте 0,5 такого не произошло.

Из графика (рис. 8) делается еще один вывод о том, что предложенный метод моделирования оседаний в пространстве, а затем во времени позволил получить для реперов не только восстановленные оседания после окончания их работы, но и до их закладки. То есть, как в случае с моделированием оседаний на поверхности, удалось получить обоснованные унаследованные оседания.

На рисунке 9 представлена полученная карта оседаний с коэффициентом порогового отношения к среднегодовой скорости оседаний 0,5.

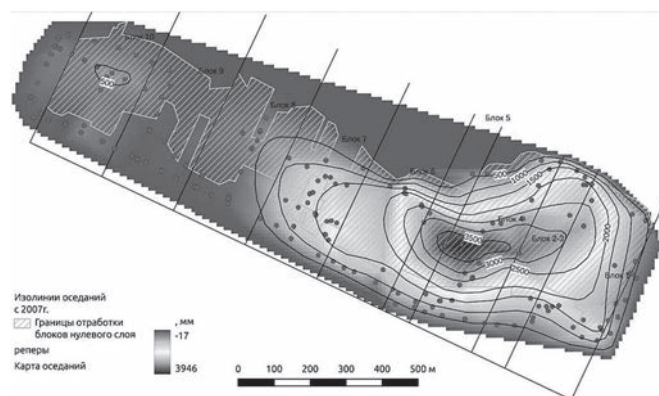


Рис. 9. Карта накопленных оседаний массива целика с $k_{th} = 0,5$ /
Fig. 9. Map of cumulative subsidence of the pillar rock mass with $k_{th} = 0,5$

В моделировании использованы только результаты инструментальных измерений.

Закключение

В работе решен вопрос определения максимальных оседаний на поверхности и в массиве Яковлевского рудника в условиях меняющейся номенклатуры реперов, при которой простое суммирование результатов мониторинга приводило к утрате данных о максимальных оседаниях, неверной оценке развития мульды, а в шахте – к полной невозможности прямого суммирования из-за утраты реперов нулевого цикла.

Применены разные подходы к восстановлению оседаний: на поверхности, где информация была утрачена частично, строились последовательные карты оседаний на каждую дату закладки новых реперов; в шахте, где ин-

формация утрачена полностью и сеть реперов менее равномерна, производилась пространственно-временная интерполяция оседаний с учетом унаследованных значений для каждого репера.

В результате работы получены обоснованные значения максимальных оседаний и построена карта развития мульды на все отдельные даты наблюдений как на поверхности, так и в массиве.

Установлено, что на поверхности восстановленные значения оседаний оказались выше измеренных, так как в расчет включились новые реперы с унаследованными (интерполированными) оседаниями от ранее существовавших. В шахте получено обоснованное значение оседаний, превышающее значение на поверхности на 17 %.

Использование принципа расчетного пространственного и временного унаследования оседаний новыми реперами позволяет максимально извлекать информацию даже с реперов, просуществовавших один цикл, и учитывать вклад каждого существовавшего репера при анализе современного состояния деформационных процессов.

Полученные в работе значения рекомендуется включить

в дальнейшие результаты мониторинга для обеспечения объективной геомеханической оценки.

При дальнейшей эксплуатации наблюдательной сети на поверхности и в шахте при закладке новых реперов рекомендуется применять принцип наследования оседаний.

Для корректного временного моделирования оседаний в местах утраченных реперов следует исходить из условия, описанного в данной работе, что уменьшение скоростей в измеряемом интервале не может быть меньше 50 % от средних скоростей за все время наблюдений.

Выводы

1. Статья посвящена исследованию восстановления истинных величин оседаний и картографированию мульды оседаний в условиях непостоянной номенклатуры реперов на маркшейдерско-геодезическом полигоне Яковлевского месторождения.

2. Результаты исследований могут быть полезными при объективной геомеханической оценке состояния массива горных пород и для обеспечения безопасной отработки месторождения в сложных горно-геологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьев А.М., Зотеев О.В., Макаров А.Б. Геомеханическое обоснование разработки Яковлевского месторождения под неосушенными водоносными горизонтами. *ГИАБ*. 2013; 4: 27-37
Grigoryev A.M., Zoteev O.V., Makarov A.B. Geomechanical substantiation for the development of the Yakovlevskoye deposit under undrained aquifers. *GIAB*. 2013; 4: 27-37. (In Russ.).
2. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Голубничий Д.В. и др. Деформационные процессы массива горных пород при отработке Яковлевского месторождения. *Горный журнал*. 2025; 10: 28-34. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.10.04>
Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Golubnichiy D.V., et al. Deformation processes in the rock mass during the mining of the Yakovlevskoye deposit. *Mining magazin*. 2025; 10: 28-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.10.04>.
3. Трушко В.Л., Протосеня А.Г., Дашко Р.Э. Гидрогеологический мониторинг на Яковлевском руднике как инструмент повышения безопасности ведения очистных работ в сложных горно-геологических условиях. *Записки горного института*. 2010; 185: 123-127
Trushko V.L., Protosenya A.G., Dashko R.E. Hydrogeological monitoring at the Yakovlevskoye mine as a tool for improving the safety of mining operations in complex mining and geological conditions. *notes of the Mining Institute*. 2010; 185: 123-127. (In Russ.).
4. Hejmanowski R. Time-space ground subsidence prediction by volume extraction from the rock mass. *Paper presented at 6th International Symposium on Land Subsidence*, 2: 24–29 September; Ravenna. 2000; 2: 29-41.
5. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. ГКИНП (ГНТА) – 03-010-03. Москва, 2004.
Instruction on I, II, III, IV class leveling. GKNP (GNTA) - 03-010-03. Moscow, 2004. (In Russ.).
6. Инструкция по наблюдениям за движением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений / Министерство цветных металлов СССР. Горное управление. Введена 03.07.86. Разработана ВНИМИ, ВНИПИгорцветмет. Москва, 1988: 112 с.
Instruction on monitoring rock and surface movement during underground mining of ore deposits. Moscow, 1988: 112. (In Russ.).
7. Кашников Ю.А., Беляев К.В., Богданец Е.С. и др. Маркшейдерское обеспечение разработки месторождений нефти и газа. 1-е изд. Москва, 2018: 454.
Kashnikov Yu.A., Belyaev K.V., Bogdanets E.S., et al. Mine surveying support for the development of oil and gas fields. Moscow, 2018: 454. (In Russ.).
8. Тютюкова В.А., Голубничий Д.В., Гилязов 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): 69-75. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_69_75
Tyutyukova V.A., Golubnichiy D.V., Gilyazev D.Kh. Determination of land subsidence from the results of joint interferometric processing of Sentinel-1a and Sentinel-1b satellite radar sounding data. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023; 2 (124): 69-75. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_69_75.
9. Анохин Н.А. Анализ влияния плотности заложения реперов наблюдательной станции Яковлевского рудника богатых железных руд на параметры сдвижений земной поверхности. *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: Материалы конференции*. Пермь, 2024; 1: 150-153.
Anokhin N.A. Analysis of the influence of benchmark network density at the Yakovlevskoye iron ore mine observation station on surface movement parameters. *Materials of the conference "Problems of developing hydrocarbon and ore mineral deposits"*. Perm, 2024; 1: 150-153. (In Russ.).
10. Ktratzsch G. Bergschadekunde. Papierflieger Verlag GmbH. 2005; 894.
11. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Шустов Д.В. Комплексные геомеханические проблемы при освоении недр. *Горный журнал*. 2025; 3: 11-18. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.02>
Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Shustov D.V. Complex geomechanical problems in subsurface resource development. *Mining magazin*. 2025; 3: 11-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.02>.

12. Учебное пособие QGIS: электронная версия. URL: <https://docs.qgis.org/3.34/ru/docs/index.html#>
QGIS training manual, electronic version. URL: <https://docs.qgis.org/3.34/ru/docs/index.html#> (In Russ.).
13. Григорьев А.М., Зотеев О.В., Макаров А.Б. и др. Разработка Яковлевского месторождения под водоносными горизонтами системой с закладкой. Развитие идей Д. М. Бронникова в области разработки рудных месторождений на больших глубинах. Под ред. акад. К. Н. Трубецкого Москва, 2013: 84-96.
Grigoryev A.M., Zoteev O.V., Makarov A.B., et al. Development of the Yakovlevskoye deposit under aquifers using a system with backfilling. Development of D.M. Bronnikov's ideas in the field of deep ore deposit mining. Moscow, 2013: 84-96.
14. Регламент гидрогеомеханического мониторинга отработки запасов богатых железных руд Яковлевского месторождения. Екатеринбург, 2020.
Regulations for hydro-geomechanical monitoring of the mining of rich iron ore reserves at the Yakovlevskoye deposit. Ekaterinburg, 2020. (In Russ.).
15. Катаев А.В. Цифровое моделирование топографических поверхностей. Пермь, 2024: 383 с.
Kataev A.V. Digital modeling of topographic surfaces. Perm, 2024: 383. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Василий Владимирович Мусихин –

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail: basil2@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3038-2241>

Никита Анатольевич Анохин –

аспирант, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: nikitaanokhin59@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-8855-2588>

Денис Хайдарович Гилязов –

начальник службы гидрогеомеханического мониторинга ООО «Яковлевский ГОК», 309070, пос. Яковлево, Российская Федерация, e-mail: dkh.gilyazev@severstal.com

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.11.2025

Поступила после рецензирования: 30.11.2025

Принята к публикации: 02.12.2025

ABOUT THE AUTHORS

Vasily V. Musikhin –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russian Federation; e-mail: basil2@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3038-2241>

Nikita A. Anokhin –

PhD student, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russian Federation; e-mail: nikitaanokhin59@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-8855-2588>

Denis Kh. Gilyazev –

Head of the Hydrogeomechanical Monitoring Service, Yakovlevsky Mining and Processing Plant LLC, 309070, Yakovlevo, Russian Federation; e-mail: dkh.gilyazev@severstal.com

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article. Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 19.11.2025

Revised: 30.11.2025

Accepted: 02.12.2025