

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ПРОДУКТИВНОЙ ТОЛЩИ И ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ ЛЕНТОЧНЫХ ГЛИН МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ГАЙДУКОВКА» С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. А. Якушев, А. Л. Киндеев

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены возможности применения геоинформационных технологий для трехмерного моделирования геологического строения и подсчета запасов месторождений ленточных глин. Исследование выполнено на примере участка месторождения «Гайдуковка» Минского района Минской области площадью 5,76 км². На основе анализа архивных материалов бурения, составляющих 195 скважин, и топографических планов сформирована пространственно привязанная база геологических данных с детальностью изучения 29 538,46 м² на одну скважину. Выполнено построение цифровых моделей рельефа, кровли и подошвы глинистого пласта в среде ArcGIS Pro с использованием модуля 3D Analyst. Для оценки объемов полезного ископаемого и вскрышных пород применен метод разности поверхностей на основе TIN-моделей. Получены количественные оценки геометрических объемов глинистой толщи и вскрыши, проанализированы особенности их пространственного распределения и соотношения. Показана возможность использования трехмерного ГИС-моделирования не только для оценки прогнозных запасов, но и для анализа фактической добычи и контроля разработки месторождения. Применение метода разности поверхностей позволило определить суммарный геометрический объем глинистой толщи в пределах полигона горного отвода, который составил 65,44 млн м³, а также объем вскрышных пород – 23,0 млн м³. Соотношение указанных показателей свидетельствует о благоприятных горно-геологических условиях разработки месторождения. Результаты исследования подтверждают эффективность применения ГИС-платформ для решения задач предварительной и оперативной оценки запасов неметаллических полезных ископаемых и могут быть использованы в проектных, научных и образовательных целях. Предложенная методика может быть рекомендована для использования в проектно-исследовательских работах, при планировании разработки месторождений общераспространенных полезных ископаемых, а также в учебных и научных целях как пример интеграции современных ГИС-технологий в практику геологии и горных наук.

Ключевые слова: геоинформационные системы; трехмерное моделирование; TIN-модель; цифровая модель рельефа; объемный анализ; недропользование; горно-геологические информационные системы.

Для цитирования. Якушев А. А., Киндеев А. Л. Трехмерное моделирование строения продуктивной толщи и подсчет запасов ленточных глин месторождения «Гайдуковка» с применением геоинформационных технологий // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 192–203.

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE STRUCTURE OF THE PRODUCTIVE STRATUM AND CALCULATION OF RESERVES OF RIBBON CLAYS OF THE GAIDUKOVKA DEPOSIT USING GEOINFORMATION TECHNOLOGIES

A. A. Yakushev, A. L. Kindeev

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. This article discusses the possibilities of using geoinformation technologies for three-dimensional modeling of the geological structure and calculating reserves of belt clay deposits. The study was carried out using the example of the site of the Haidukovka deposit in the Minsk region of the Minsk region, with an area of 5.76 km². Based on the analysis of archival drilling materials comprising 195 wells and topographic plans, a spatially linked database of geological data was formed, with a study detail of 29,538.46 m² per well. Digital models of the relief, roof, and bottom of the clay formation were built in the ArcGIS Pro environment using the 3D Analyst module. The surface difference method based on TIN models was used to estimate the volume of minerals and overburden. Quantitative estimates of the geometric volumes of clay strata and overburden have been obtained, and the features of their spatial distribution and ratios have been analyzed. The possibility of using three-dimensional GIS modeling is shown not only for estimating forecast reserves, but also for analyzing actual production and monitoring field development. The application of the surface difference method made it possible to determine the total geometric volume of clay strata within the landfill of the mining allotment, which amounted to 65.44 million m³, as well as the volume of overburden rocks – 23.0 million m³. The ratio of these indicators indicates favorable mining and geological conditions for the development of the deposit. The results of the study confirm the effectiveness of GIS platforms for solving the tasks of preliminary and operational assessment of non-metallic mineral

reserves and can be used for design, scientific and educational purposes. The proposed methodology can be recommended for use in design and survey work, in planning the development of deposits of common minerals, as well as for educational and scientific purposes as an example of the integration of modern GIS technologies into the practice of geology and mining sciences.

Keywords: geoinformation systems; three-dimensional modeling; TIN-model; digital relief model; volumetric analysis; subsurface use; mining and geological information systems.

For citation. Yakushev A. A., Kindeev A. L. Three-dimensional modeling of the structure of the productive stratum and calculation of reserves of ribbon clays of the Gaidukovka deposit using geoinformation technologies. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 192–203.

Введение. Геоинформационные технологии в настоящее время находят широкое применение практически во всех сферах науки и производства. За последние три десятилетия уровень использования геоинформационных систем (ГИС) в горнодобывающей отрасли существенно возрос, и трехмерное моделирование стало неотъемлемым элементом процессов поиска, разведки и освоения месторождений полезных ископаемых. Одним из ключевых направлений в данной области является моделирование строения четвертичной толщи. В последние годы заметно возрос интерес к использованию ГИС для моделирования и оптимизации проектных технологических решений по отработке запасов месторождений. Это связано с возможностью системного учета больших объемов исходных данных и их интеллектуальной графической интерпретации.

Особенностью геологических данных, используемых в ГИС горного профиля, является сложность количественной оценки их достоверности. Поскольку цифровое моделирование предполагает адекватное отображение природных объектов, любые неточности исходной информации приводят к искажению проектных, технологических и управленческих решений. При существенных ошибках это может стать причиной возникновения нештатных или аварийных ситуаций в производстве.

Достоверные сведения о количественных и качественных характеристиках ресурсного потенциала, интеллектуальная обработка данных и их сопоставление с нормативно-правовой базой недропользования создают основу для формирования новых геоинформационных моделей в горно-геологических информационных системах (ГГИС). Такие модели учитывают как особенности горно-геологической структуры, так и специфику нормативно-методической базы проектирования разработки месторождений [1].

Современный этап развития горно-геологических исследований характеризуется не столько переходом от разрозненных двумерных представлений к трехмерным цифровым моделям месторождений, которые начали активно применяться еще в 1990-е годы [2], сколько их дальнейшим развитием и усложнением. Трехмерные модели рассматриваются как динамичные пространственные системы, интегрирующие разнородные геологические, геофизические и горнотехнические данные, обеспечивающие возможность многовариантного анализа, учета неопределенности и поддержки управленческих решений на всех стадиях освоения месторождений. Такие модели выступают не только инструментом визуализации, но и основой для количественного анализа, планирования горных работ и принятия управленческих решений. Поскольку поиск поверхностных или приповерхностных месторождений полезных ископаемых становится все более сложным, для разведки закрытых месторождений все чаще применяется трехмерное геологическое моделирование на основе ГИС [3].

В отличие от специализированных горно-геологических программных комплексов, универсальные ГИС-платформы ориентированы на работу с широким спектром пространственных данных и не всегда напрямую адаптированы к задачам недропользования. Однако их развитые средства пространственного анализа, трехмерной визуализации и работы с поверхностями создают предпосылки для использования таких систем в качестве инструмента предварительной оценки запасов, в частности для месторождений неметаллических полезных ископаемых, требующих сложного геостатистического аппарата [4].

В связи с вышесказанным, цель настоящего исследования заключается в разработке методики моделирования строения месторождений полезных ископаемых с использованием геоинформационных систем. Полученные результаты могут быть применены при проектировании и оптимизации разработки месторождений глин и других неметаллических полезных ископаемых, в геологоразведочных и изыскательских работах для повышения точности моделирования и оценки запасов, в образовательных и научных целях в качестве примеров использования современных ГИС-технологий в горной геологии, а также для совершенствования информационных систем недропользования, требующих интеграции и визуализации больших объемов геологических данных.

Состояние изученности вопроса. Количественная оценка запасов полезного ископаемого опирается прежде всего на методы пространственной статистики. Формальная теория скрининга и ряд базовых концепций геостатистики были разработаны в трудах Ж. Матерона и его школы в 1970-е годы [5–7],

что создало математическую базу для оценки средних значений и неопределенности по точечным данным керна и бурения. С развитием доступных электронно-вычислительных машин и графических рабочих станций в 1970–80-е годы появились коммерческие и специализированные решения для геологии и горного планирования. Один из наиболее известных пакетов – Surpac – начал коммерческую дистрибуцию в начале 1980-х годов [8]. Тогда же формировались компании Gemcom, Datamine и другие, внедрявшие рабочие процессы учета данных бурения, блочного моделирования и проектирования работ. Эти продукты впервые объединили базы керновых данных, простые 3D-визуализации и блочные оценки запасов на практике [9].

В академической среде в конце 1980-х – начале 1990-х годов был разработан GOCAD (Geological Object Computer Aided Design) – программная платформа, ориентированная на трехмерное представление геологических тел, структурную интерпретацию и топологически корректное построение поверхностей. Это дало мощные инструменты для интеграции геологической, геофизической и буровой информации в единую 3D-модель [10]. С 1990-х годов по настоящее время происходило сращивание: 3D-геологические пакеты (GOCAD, Move и др.) и индустриальные решения (Surpac, Datamine, MineSight) начали обмениваться данными с ГИС-системами, появились методики вокселей, объемных (блочных) моделей и интеграции атрибутов [11]. Одновременно активно развивалась практика стохастического моделирования (передача неопределенности в оценках) [12], а также визуализация для горных инженеров и регуляторов.

Одними из первых опубликованных примеров практического применения ГИС в задачах количественной оценки минерального потенциала являются работы М. Скотта (2000), где рассмотрены моделирование благоприятных зон и оценка числа потенциально неоткрытых месторождений в Квинсленде (Австралия) [13]. В отечественной литературе можно встретить первые примеры использования ГИС ArcView для подсчета уже добытого ископаемого на примере месторождения строительного камня (базальта) [14]. В более актуальных статьях выделяют подсчет запасов и составление плана развития горных работ на указанных месторождениях с применением пакета программ ArcGIS и MapInfo на примере Риштанского месторождения красных глин (Узбекистан) [15].

Актуальность настоящего исследования определяется тем, что, несмотря на широкое распространение цифровых технологий в горнодобывающей отрасли, наиболее значимые новые работы по созданию комплексных трехмерных геологических моделей месторождений, в частности с использованием программного продукта ArcGIS Pro, практически отсутствуют, несмотря на то что позитивное влияние IT-технологий на геологическую науку и практику уже трудно оспорить [16]. Приложение от компании ESRI традиционно позиционируется как универсальная ГИС-платформа с развитым инструментарием пространственного анализа и 3D-визуализации, однако его потенциал для задач подсчета запасов и построения цифровых двойников месторождений до настоящего времени недостаточно изучен. Исследование возможностей интеграции и адаптации программного продукта к задачам построения цифровой модели месторождений и оценки запасов не только восполняет существующий научно-методический пробел, но и открывает перспективы для разработки рабочих процессов в области цифровой геологии и недропользования. Дополнительным фактором актуальности является возрастающая потребность в цифровизации архивных геологических материалов и их интеграции в современные информационные системы. Перевод данных бурения и топографических планов в цифровую форму с последующим трехмерным моделированием позволяет не только сохранить и актуализировать накопленные сведения, но и существенно расширить возможности их аналитического использования, включая переоценку запасов, анализ пространственной структуры продуктивных толщ и сопоставление проектных и фактических показателей разработки.

Объект и методы исследований. Объектом исследования послужил участок месторождения ленточных глин «Гайдуковка» Минского района Минской области, с гипсометрией по состоянию на 1967 г. (рис. 1). Общая площадь месторождения, с прилегающими территориями – 7,52 км², территории горного отвода – 5,76 км². В рамках территории отвода пробурено 195 скважин, учтенных к подсчету. Детальность изучения составляет 29 538,46 м² на одну скважину.

Расположено в пределах юго-восточной части Нарочано-Вилейской низменности. Полезное ископаемое залегает на моренных отложениях сожского подгоризонта припятского горизонта. Поверхность характеризуется мелко- и среднехолмистым рельефом. Абсолютные отметки поверхности месторождения изменяются от 207,8 до 231 м, в северной части достигают 240–250 м. Мощность четвертичных отложений в районе месторождения «Гайдуковка» изменяется от 160 до 200 м, на Минской возвышенности, расположенной юго-западнее и южнее, – от 170 до 272 м. Моренные отложения сожского подгоризонта припятского горизонта встречены скважинами в центральной части месторождения, иногда выходят на поверхность. Они слагают на месторождении дно ледниковой котловины, которая заполнена озерно-ледниковыми и озерно-аллювиальными аккумуляциями. Абсолютные отметки залегания поверхности моренных отложений колеблются от 185,6 м в центре месторождения до 215–220 м в краевых частях.

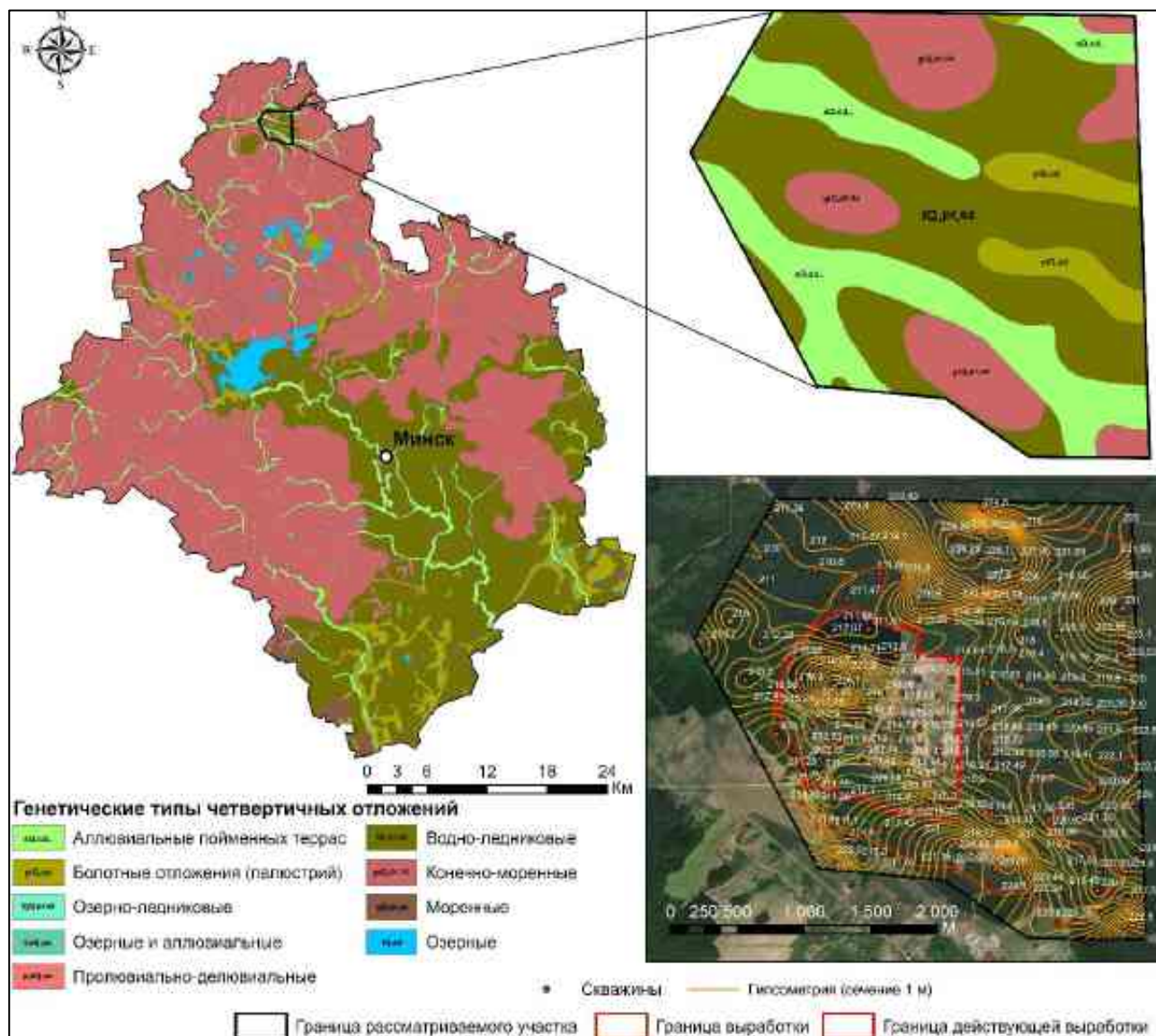


Рис. 1. Обзорная картосхема месторождения «Гайдуковка»
(генетические индексы приведены в соответствии с местной классификацией)

Fig. 1. Overview map of the Gaidukovka deposit
(the genetic indexes are given in accordance with the local classification)

Моренные отложения на месторождении на полную мощность не пройдены бурением, вскрытая мощность их достигает 26 м. Представлены моренные образования коричневато-бурыми, желто-бурыми грубыми супесями и в единичных случаях гравелистыми песками. Абсолютные отметки подошвы озерно-ледниковых отложений колеблются от 185,6 м в западной части месторождения до 248,6 м – в восточной. Абсолютные отметки кровли от 202,2 м до 230 м на западе и от 220 до 265 м на востоке месторождения. Мощность их колеблется от десятков сантиметров в краевых частях до 32,5 м в центральной части месторождения. Представлены озерно-ледниковые отложения ленточными глинами, реже суглинками и супесями, алевроитами и тонкими песками. Мощность слоев в ленточных глинах колеблется от 1,2 мм до 20 мм, в среднем составляет 2–5 мм. Средняя мощность глинистой толщи 10–12 м.

По данным опытного подсчета лент в полезной толще [17] длительность осадконакопления можно оценить примерно в 6–8 тыс. лет. Полезное ископаемое залегает пластообразно, выклиниваясь в краевых частях месторождения, толща имеет в плане овальную форму, вытянута в субширотном направлении и имеет размеры до 5 км в длину, до 3 км в ширину, площадь около 8 км².

Для подсчета запасов были использованы топографические планы [18], пространственно привязанные к территории исследований. Для занесения атрибутов, соответствующих каждой скважине, использовались данные бурения [19], коротко отраженные в табл. 1. Моделирование проводили в программном продукте ArcGIS Pro с использованием модуля 3D Analyst.

Таблица 1. Пример сокращенного варианта описания разреза скважины

Table 1. An example of an abbreviated version of the description of a well section

№ п/п	Наименование и номер выработки	Абсолютная отметка устья, м	Глубина, м	Геологический индекс	Краткое описание пород	Глубина залегания, м		Мощность, м
						от	до	
1.	Скв. 912	212,41	15,0	Q _{4sd}	1.Растительный слой	0,0	0,2	0,2
				laQ _{3pz4}	2. Песок серовато-желтый, мелкозернистый	0,2	1,4	1,2
				lgQ _{2pr2sž}	3. Глина темно-коричневая, жирная	1,4	6,5	5,1
				gQ _{2pr2sž}	4. Супесь темно-коричневая, грубая	6,5	15,0	8,5

Всего было оцифровано 195 скважин с высотными значениями в диапазоне от 201,2 до 231,0 м. Помимо точечных объектов, в виде линейных элементов была нанесена граница горного отвода участка, согласно проектной документации. В ранее созданную базу данных были внесены сведения о мощности каждого стратиграфического слоя в пределах скважин. На основании этих данных выполнено построение поверхностей кровли и подошвы глинистого пласта, а также модели поверхности забоя скважин. Кроме того, созданные поверхности были преобразованы в формат нерегулярной треугольной сети (TIN), что позволило с использованием инструмента «Разность поверхностей» определить объем толщ, заключенных между слоями. Схожий метод триангуляционной сети показал свою эффективность в подсчете запасов верхнемиоценовой глины в Ираке, показавший хорошие результаты моделирования [20].

Следует также отметить, что данный инструмент предназначен для геометрического сравнения треугольных элементов двух исходных поверхностей. В процессе анализа треугольники первой поверхности классифицируются в зависимости от их положения относительно второй (базовой) поверхности – как полностью расположенные выше, ниже либо пересекающие ее. В случае пересечения исходные треугольники делятся на отдельные фрагменты, которые далее также распределяются по следующим категориям: выше, ниже или совпадающие (копланарные) с базовой поверхностью. Однородные по классификации фрагменты и соседние треугольники объединяются в полигоны, для которых рассчитываются объемные параметры. Суммирование этих значений позволяет получить итоговые объемы по каждому полигону, а результаты вычислений сохраняются в виде полигонального слоя пространственных объектов [21].

Результаты и их обсуждение. На основании сформированной базы данных точек буровых скважин построены GRID-модели поверхностей, отражающие рельеф территории по состоянию на 1967 г. до начала разработки месторождения, а также пространственное положение кровли и подошвы глинистого пласта. Интерполяция исходных данных выполнена с учетом пространственного распределения скважин и морфологических особенностей рельефа. Полученные растровые модели были впоследствии преобразованы в формат нерегулярной треугольной сети (TIN), что позволило более точно аппроксимировать сложные формы геологических границ, минимизировать сглаживание локальных аномалий и обеспечить корректность дальнейших объемных расчетов (рис. 2).

Анализ построенной трехмерной модели показал, что кровля пласта ленточных глин характеризуется выраженной волнистой морфологией, обусловленной сочетанием первичных условий осадконакопления в озерно-ледниковой обстановке и деятельностью последующих экзогенных процессов. Абсолютные отметки кровли изменяются в пределах от 201,2 до 224,6 м, при этом наибольшие значения приурочены преимущественно к восточной, северо-восточной и южной частям исследуемого участка. Такая закономерность отражает как общее погружение поверхности в центральной части ледниковой котловины, так и влияние рельефа поверхности подстилающих моренных отложений.

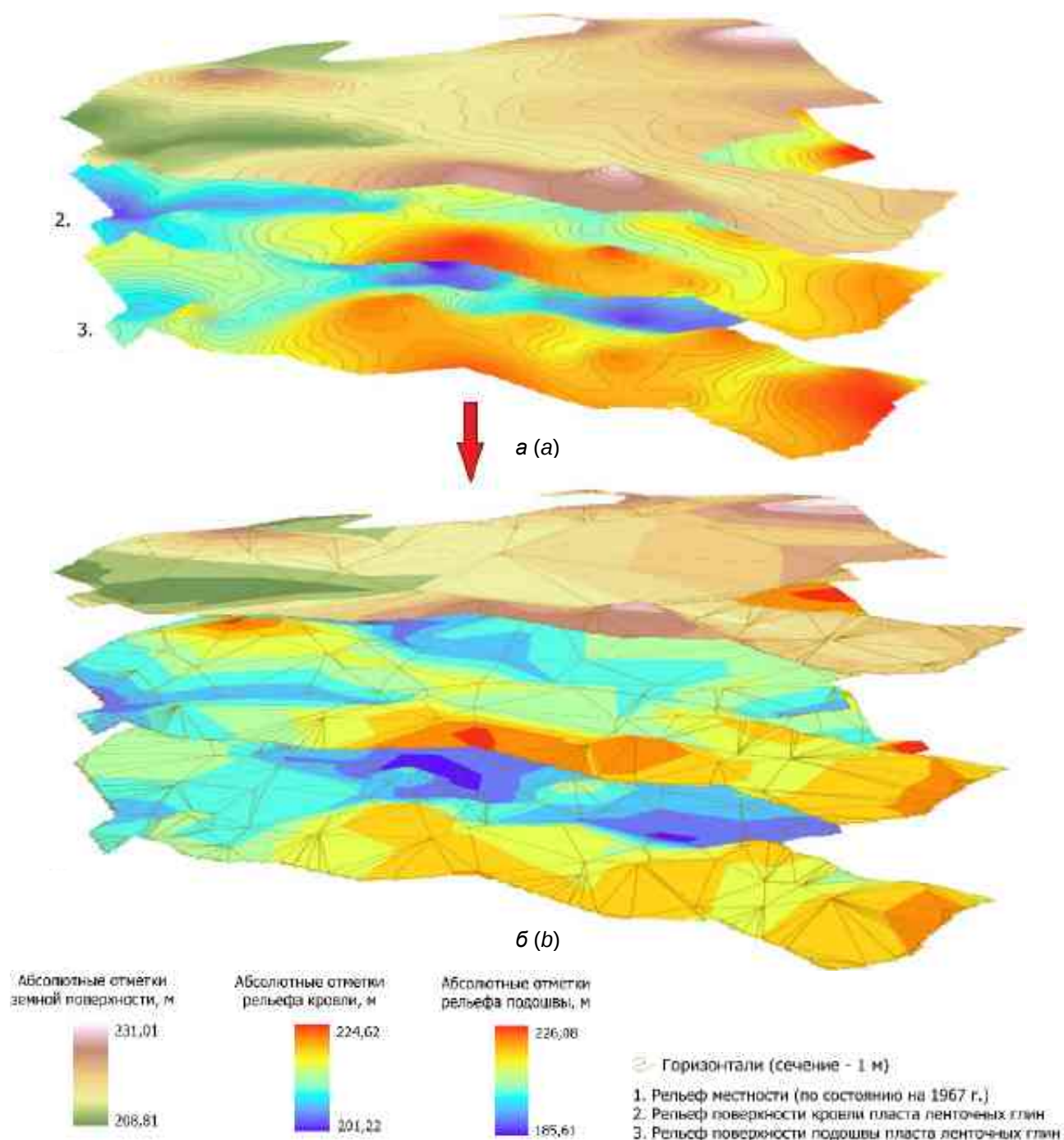


Рис. 2. Построенные 3D-поверхности: а – GRID-модель; б – TIN-модель

Fig. 2. Constructed 3D surfaces: a – GRID model; b – TIN model

Подошва пласта ленточных глин характеризуется более сглаженной и устойчивой формой по сравнению с кровлей и залегает непосредственно на моренных отложениях сожского подгоризонта припятского горизонта. Пространственное положение подошвы и характер ее поверхности подтверждают генетическую связь глинистой толщи с озерно-ледниковыми условиями осадконакопления, при которых формирование ленточных глин происходило в относительно спокойной гидродинамической обстановке на дне ледниковой котловины. Отсутствие резких перепадов отметок подошвы свидетельствует о стабильности базиса осадконакопления на этапе формирования продуктивной толщи.

Построенная модель мощности пласта отражает преимущественно пластообразный характер залегания полезного ископаемого с закономерным увеличением мощности в центральной части месторождения и ее постепенным уменьшением к периферии, вплоть до полного выклинивания в краевых зонах.

Максимальные значения мощности глинистой толщи, достигающие 24,9 м, приурочены к центральной части ледниковой котловины, где создавались наиболее благоприятные условия для накопления тонко-дисперсного материала. Следует отметить, что данные участки в значительной степени уже отработаны, что подтверждается результатами ретроспективного анализа процесса разработки месторождения.

В периферийных зонах месторождения мощность ленточных глин уменьшается до нескольких метров и менее, что обусловлено как изменением литологических условий, так и влиянием неровностей рельефа подстилающей поверхности моренных отложений. Тем не менее анализ пространственного распределения мощности и морфологии пласта позволяет выделить северо-восточную часть участка как перспективную для дальнейшей разработки, где средняя мощность глинистой толщи составляет порядка 15–16 м при относительно благоприятном соотношении мощности полезного ископаемого и вскрышных пород.

В результате вычислений был получен суммарный геометрический объем глинистой толщи, а также объем вскрышных пород (табл. 2). Поверхность, сформированная на основе указанной разности, создается с использованием ограниченной триангуляции Делоне и геометрического сопоставления двух исходных поверхностей. Значения координаты z у данной разностной поверхности отражают высотное различие между этими поверхностями [21]. Полученное значение отражает объем полезного ископаемого без учета потерь и может рассматриваться как основа для дальнейших технико-экономических расчетов.

Таблица 2. Итог вычислений разности поверхностей

Table 2. The result of calculating the surface difference

Поверхность	Площадь полигона, км ²	Объем, м ³
Вскрышные породы	5,76	23 001 763,41
Глинистая толща		65 440 951,63

Суммарный геометрический объем глинистой толщи в пределах полигона горного отвода составляет 65,44 млн м³, тогда как объем вскрышных пород оценивается в 23,0 млн м³. Соотношение объемов полезного ископаемого и вскрыши свидетельствует о сравнительно благоприятных горно-геологических условиях разработки месторождения, характеризующихся значительной мощностью продуктивной толщи при относительно умеренных объемах вскрышных работ.

Важным преимуществом примененной методики является ее универсальность и масштабируемость, что позволяет рассматривать подсчет запасов не только в границах всего полигона горного отвода, но и в пределах отдельных локальных участков и блоков. Использование полигональных объектов в качестве масок анализа дает возможность выполнять объемные расчеты для произвольно выделенных зон, что особенно актуально при поэтапной разработке месторождений, проектировании очередности выемки полезного ископаемого и уточнении запасов в пределах эксплуатационных блоков.

Кроме того, предложенный подход может быть эффективно использован для оценки объемов уже выработанного полезного ископаемого. Путем сопоставления TIN-моделей рельефа до начала горных работ с актуальным фотоизображением месторождения (рис. 3) возможно определение объема извлеченной глинистой толщи и вскрышных пород за заданный временной интервал с последующим сравнением с отчетными материалами (табл. 3). Такой подход позволяет автоматизировать контроль фактической добычи, повысить точность учета извлеченных запасов и обеспечить сопоставимость проектных и фактических показателей разработки.

Суммарный объем извлеченного полезного ископаемого по всем рассмотренным участкам составляет 9,74 млн м³ при общем объеме вскрышных пород 2,24 млн м³, что в целом соответствует выявленным ранее закономерностям соотношения полезного ископаемого и вскрыши.

Анализ распределения объемов по отдельным полигонам показывает существенную неоднородность параметров выработки, что обусловлено как различиями в площади участков, так и изменчивостью мощности глинистого пласта. Наибольшие объемы извлеченной глинистой толщи приурочены к полигонам с максимальной площадью (участки № 1, 4, 9), что подтверждает корректность применения методики разностного анализа поверхностей для оценки фактической добычи. В то же время малые по площади полигоны характеризуются незначительными объемами извлеченных пород, что демонстрирует высокую чувствительность метода к масштабированию расчетной области. Сопоставление рассчитанных объемов с архивными данными о добыче полезного ископаемого за 1984–2001 гг. показывает принципиальную сопоставимость порядков величин, несмотря на различия в методиках подсчета и исходных данных.



Рис. 3. Отработанные полигоны, фрагмент аэрофотоснимка 2025 г.

Fig. 3. Spent landfills, fragment of an aerial photograph from 2025

Таблица 3. Сравнение извлеченных объемов горных масс

Table 3. Comparison of extracted volumes of rock masses

№ п/п	Площадь, м ²	Объем извлеченных вскрышных пород, м ³	Объем извлеченного полезного ископаемого, м ³	Отработано за 1984–2001 гг., тыс. м ³ (категории запасов А, В, С ₁ , С ₂) [17]
1.	111 000	217 108,36	575 756,62	8782,00
2.	40 800	19 001,04	290 689,31	
3.	43 000	42 008,24	621 622,61	
4.	404 000	1 029 931,68	5 087 569,43	
5.	4200	2754,12	7882,70	
6.	1300	144,02	1319,72	
7.	5800	3762,72	7222,38	
8.	900	93,58	656,45	
9.	192 200	929 286,53	3 150 172,45	
Всего	803 200	2 244 090,29	9 742 891,67	

Результаты трехмерного анализа также позволяют увязать пространственные особенности отработки месторождения с динамикой производственных показателей карьера в постпроектный период. После 2002 г. фактическая производительность карьера по добыче глинистого сырья характеризуется устойчивым снижением и в течение длительного времени не достигает проектного уровня 605 тыс. м³ в год [17]. Согласно расчетам, объем добытой глины с 2002 г. по настоящее время достигает порядка 961 тыс. м³ за более чем 23 года отработки месторождения. Данная тенденция обусловлена, с одной стороны, значительной выработкой наиболее мощных и технологически благоприятных участков центральной части месторождения, а с другой – переходом к эксплуатации зон, отличающихся меньшей мощностью глинистой толщи и менее благоприятным соотношением полезного ископаемого и вскрышных пород; при этом, исходя из картограммы, построенной методами геостатистического трехмерного байесовского кригинга [22], наибольшая доля глинистого пласта с глубиной наблюдается именно в северо-восточной части участка, в рамках территории, на данный момент составляющей лесной массив (рис. 4). Следует отметить, что данный показатель отражает соотношение мощности пласта глины к глубине скважины, выраженный в процентах.

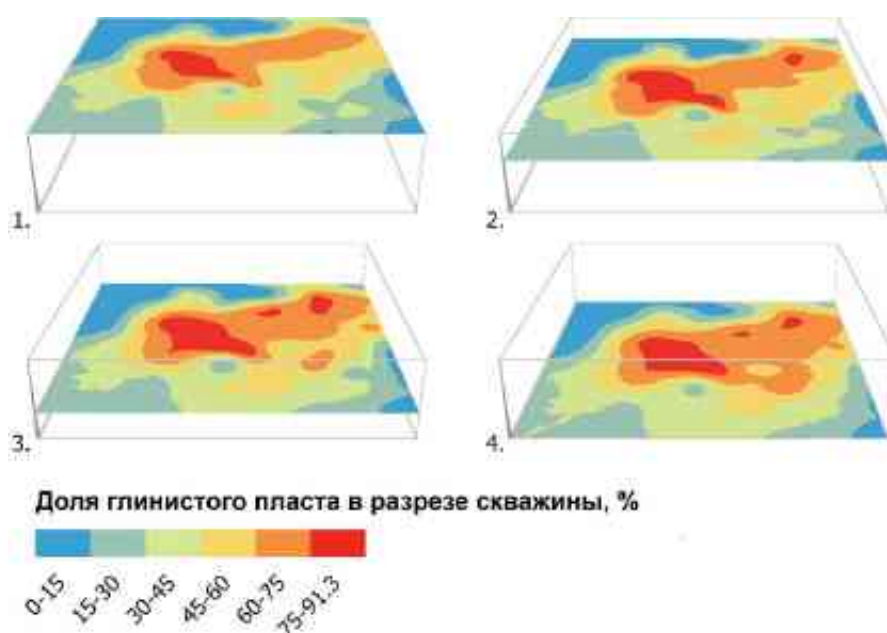


Рис. 4. Трехмерная геостатистическая модель карьера «Гайдуковка», отражающая долю мощности глинистого пласта в разрезе скважины на разных глубинах:
1 – 5,1 м; 2 – 14,3 м; 3 – 23,4 м; 4 – 32,5 м

Fig. 4. Three-dimensional geostatistical model of the Gaidukovka quarry, reflecting the proportion of clay formation in the section of the well at different depths:
1 – 5.1 m; 2 – 14.3 m; 3 – 23.4 m; 4 – 32.5 m

На основе анализа трехмерной геостатистической модели, установлено, что наиболее благоприятные условия для выработки полезного ископаемого приурочены к северо-восточной части территории месторождения. Вместе с тем сопоставление результатов моделирования с настоящей ситуацией ведения горных работ, отраженной на спутниковых снимках, показывает, что текущая разработка сосредоточена преимущественно вне данной зоны. Это свидетельствует о несоответствии направлений выработки объективным геостатистическим характеристикам продуктивной толщи, что может приводить к снижению эффективности добычи и росту удельных затрат. Полученные результаты подчеркивают необходимость корректировки планов разработки с учетом выявленных пространственных закономерностей распределения запасов. В условиях недостижения проектной производительности карьер «Гайдуковка» функционирует с пониженной загрузкой производственных мощностей, что в совокупности с ростом себестоимости добычи обуславливает его статус планово-убыточного подразделения ОАО «Керамин». В этом контексте результаты трехмерного ГИС-моделирования представляют практическую ценность как инструмент объективной оценки текущего состояния ресурсной базы и обоснования возможных сценариев оптимизации дальнейшей разработки месторождения.

Заключение. В ходе проведенного исследования рассмотрена возможность применения геоинформационных технологий для построения трехмерной цифровой модели месторождения ленточных глин и подсчета объемов полезного ископаемого и вскрышных пород на примере участка месторождения «Гайдуковка». Полученные результаты подтверждают целесообразность использования ГИС, в частности ArcGIS Pro, для решения задач моделирования геологического строения и предварительной оценки запасов неметаллических полезных ископаемых.

На основе архивных материалов бурения и топографических данных сформирована пространственно согласованная база геологических данных, выполнено построение поверхностей кровли и подошвы глинистого пласта, а также создана трехмерная модель продуктивной толщи с использованием TIN-представления. Применение метода разности поверхностей позволило определить суммарный геометрический объем глинистой толщи в пределах полигона горного отвода, который составил 65,44 млн м³, а также объем вскрышных пород – 23,0 млн м³. Соотношение указанных показателей свидетельствует о благоприятных горно-геологических условиях разработки месторождения.

Показано, что разработанный подход обеспечивает высокую наглядность интерпретации геологического строения, позволяет учитывать сложную морфологию границ пласта и является масштабируемым, что делает его применимым как для оценки запасов в целом по месторождению, так и для анализа отдельных эксплуатационных блоков. Дополнительно продемонстрирована возможность использования трехмерного ГИС-моделирования для ретроспективной оценки объемов фактически извлеченного полезного ископаемого и вскрышных пород, а также для контроля соответствия проектных и фактических показателей добычи.

Вместе с тем установлено, что точность получаемых результатов во многом определяется качеством и плотностью сети буровых скважин, а также выбранными методами интерполяции поверхностей. К ограничениям ArcGIS Pro следует отнести отсутствие специализированных инструментов геостатистической оценки неопределенности запасов, что характерно для профильных горно-геологических программных комплексов. Несмотря на это, универсальные ГИС-технологии могут эффективно применяться на стадиях детального изучения, оперативного уточнения геологической модели и предварительной оценки запасов.

Результаты настоящего исследования подтверждают перспективность использования ArcGIS Pro для построения цифровых моделей месторождений ленточных глин и решения прикладных задач недропользования. Предложенный методический подход может быть рекомендован для использования в проектно-изыскательских работах, при планировании разработки месторождений неметаллических полезных ископаемых, а также в учебных и научных целях как пример интеграции современных ГИС-технологий в практику геологии и горных наук.

Список использованных источников

1. Митюнина, И. Ю. Особенности технологии 3D-моделирования в горно-геологических информационных системах / И. Ю. Митюнина // Горно-геологические информационные системы / под ред. д-ра техн. наук, проф. В. И. Костицына. – Мн., 2018. – С. 217–222.
2. Sides, E. J. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining / E. J. Sides // *Geologische Rundschau*. – 1997. – Т. 86, № 2. – С. 342–353.
3. Liu, Y. Developments in quantitative assessment and modeling of mineral resource potential : an overview / Y. Liu, E. J. M. Carranza, Q. Xia // *Natural Resources Research*. – 2022. – Т. 31, №. 4. – С. 1825–1840.
4. Применение геостатистического алгоритма коррекции данных ГИС при моделировании сложнопостроенных залежей углеводородов на этапе доразведки месторождения / В. Л. Шустер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2021. – Т. 63, №. 5. – С. 91–99.
5. Matheron, G. The intrinsic random functions and their applications / G. Matheron // *Advances in Applied Probability*. – 1973. – Vol. 5. – P. 439–468.
6. Matheron, G. The intrinsic random functions and their applications / G. Matheron. – Fontainebleau : Centre of Geostatistics, 1978. – 175 p.
7. Matheron, G. The theory of regionalized variables and its applications / G. Matheron. – Fontainebleau : Centre of Geostatistics, 1971. – 212 p.
8. Surpac – mine planning software. – URL: <https://www.surpac.co.za/> (date of access: 28.10.2025).
9. Рубцова, Е. В. О создании геоинформационных систем сопровождения подземных горных работ / Е. В. Рубцова // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2005. – Т. 2. – С. 106–113.
10. Mallet, J. L. GOCAD: A computer aided design program for geological applications / J. L. Mallet // *Three-dimensional modeling with geoscientific information systems*. – Dordrecht : Springer Netherlands, 1992. – P. 123–141.
11. Building 3D geological models directly from the data? A new approach applied to Broken Hill, Australia // *US Geological survey Open-file report*. – 2005. – Т. 1428. – С. 119–130.

12. Демьянов, В. В. Геостатистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева. – М. : Наука, 2010. – 327 с.
13. Scott, M. GIS: modern mineral potential modelling and quantitative resource assessment: implications for the Geological Survey of Queensland / M. Scott // Australian Institute of Geoscientists Journal. – 2000. – URL: <https://www.aig.org.au> (date of access: 29.10.2025).
14. Дранишников, П. С. Использование ГИС-технологий при подсчете запасов полезного ископаемого / П. С. Дранишников, Т. А. Кувашкина, Е. А. Конкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 4. – С. 171–173.
15. Калдыбаев, Н. А. Моделирование разработки малых месторождений нерудных полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий / Н. А. Калдыбаев, А. М. Абдыкадыров, Ж. Маматов // Наука. Образование. Техника. – 2016. – № 2. – С. 86–94.
16. Волянская В. В. Тестирование и верификация новых технологий в науках о Земле: методические рекомендации // Георесурсы. – 2021. – Т. 23, №. 2. – С. 192–196.
17. Проект постоянных кондиций для подсчета запасов глин на месторождении Гайдуковка ОАО «Керамин» Минского района Минской области с пересчетом запасов по состоянию на 01.01.2002 г. : пояснительная записка. – Мн. : Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, НИРУП «Силикат», 2003. – 333 с.
18. Отчет о результатах дополнительных геологоразведочных работ по переводу части запасов категории С₂ в промышленные категории на месторождении глин Гайдуковка Минского района и области БССР с подсчетом запасов на 01.01.1984 : графические приложения. – Мн. : Мин-во промышленности строительных материалов БССР, 1984. – 5 л.
19. Отчет о результатах дополнительных геологоразведочных работ по переводу части запасов категории С₂ в промышленные категории на месторождении глин Гайдуковка Минского района и области БССР с подсчетом запасов на 01.01.1984 : текстовые приложения. – Мн. : Мин-во промышленности строительных материалов БССР, 1984. – 210 с.
20. Awad, A. M. Reserve estimation of Late Miocene Injana claystone beds for portland cement and brick industry, Middle of Iraq / A. M. Awad, S. M. Awadh // The Iraqi Geological Journal. – 2020. – С. 1–16.
21. Surface Difference (3D Analyst). – URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/surface-difference.htm> (date of access: 26.10.2025).
22. Киндеев, А. Л. Трехмерное геостатистическое моделирование запасов глин на примере карьера «Гайдуковка» / А. Л. Киндеев, А. А. Якушев // ГИС-технологии в науках о Земле. – 2025. – С. 279–283.

References

1. Mityunina I. Yu. *Osobennosti tekhnologii 3D-modelirovaniya v gorno-geologicheskikh informatsionnykh sistemakh* [Features of 3D modeling technology in mining and geological information systems]. *Gorno-geologicheskie informatsionnye sistemy* [Mining and Geological Information Systems]. Kostitsyn V. I. (ed.). Minsk, 2018, pp. 217–222. (in Russian)
2. Sides E. J. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. *Geologische Rundschau*, 1997, vol. 86, no. 2, pp. 342–353.
3. Liu Y., Carranza E. J. M., Xia Q. Developments in quantitative assessment and modeling of mineral resource potential: an overview. *Natural Resources Research*, 2022, vol. 31, no. 4, pp. 1825–1840.
4. Shuster V. L. et al. *Primenenie geostatisticheskogo algoritma korrektsii dannykh GIS pri modelirovanii slozhnopostroyennykh zalezhei uglevodorodov na etape dorazvedki mestorozhdeniya* [Application of a geostatistical algorithm for well log data correction in modeling complex hydrocarbon reservoirs at the stage of additional exploration]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka = Proceedings of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration*, 2021, vol. 63, no. 5, pp. 91–99. (in Russian)
5. Matheron G. The intrinsic random functions and their applications. *Advances in Applied Probability*, 1973, vol. 5, pp. 439–468.
6. Matheron G. The intrinsic random functions and their applications. *Fontainebleau : Centre of Geostatistics*, 1978, 175 p.
7. Matheron G. The theory of regionalized variables and its applications. *Fontainebleau : Centre of Geostatistics*, 1971, 212 p.
8. Surpac – mine planning software. – URL: <https://www.surpac.co.za/> (accessed October 28, 2025).
9. Rubtsova E. V. *O sozdaniy geoinformatsionnykh sistem soprovozhdeniya podzemnykh gornykh rabot* [On the development of geoinformation systems for underground mining support]. *Interekspos Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2005, vol. 2, pp. 106–113. (in Russian)
10. Mallet J. L. GOCAD: A computer aided design program for geological applications. *Three-dimensional modeling with geoscientific information systems*. Dordrecht, Springer Netherlands Publ., 1992, pp. 123–141.
11. McInerney P. et al. Building 3D geological models directly from the data? A new approach applied to Broken Hill, Australia. *U. S. Geological Survey Open-File Report*, 2005, no. 1428, pp. 119–130.
12. Demyanov V. V., Savel'eva E. A. *Geostatistika: teoriya i praktika* [Geostatistics: theory and practice], Moscow, Nauka Publ., 2010, 327 p. (in Russian)
13. Scott M. GIS: modern mineral potential modelling and quantitative resource assessment: implications for the Geological Survey of Queensland. *Australian Institute of Geoscientists Journal*, 2000. URL: <https://www.aig.org.au> (accessed October 29, 2025).

14. Dranishnikov P. S., Kuvashkina T. A., Konkin E. A. *Ispol'zovanie GIS-tekhnologii pri podschyote zapasov poleznogo iskopaemogo* [Application of GIS technologies in mineral reserve estimation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'* = *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2004, no. 4, pp. 171–173. (in Russian)
15. Kaldybaev N. A., Abdykadyrov A. M., Mamatov Zh. *Modelirovanie razrabotki malykh mestorozhdenii nerudnykh poleznykh iskopaemykh s ispol'zovaniem geoinformatsionnykh tekhnologii* [Modeling of small non-metallic mineral deposits development using geoinformation technologies]. *Nauka. Obrazovanie. Tekhnika* = *Science. Education. Technic*, 2016, no. 2, pp. 86–94. (in Russian)
16. Volyanskaya V. V. *Testirovanie i verifikatsiya novykh tekhnologii v naukakh o Zemle: metodicheskie rekomendatsii* [Testing and verification of new technologies in Earth sciences: methodological guidelines]. *Georesursy* = *Geo resources*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 192–196, DOI: 10.18599/grs.2021.2.19 (in Russian)
17. *Proekt postoyannykh konditsii dlya podschyota zapasov glin na mestorozhdenii Gaidukovka OAO "Keramin" Minskogo raiona Minskoi oblasti s pereschyotom zapasov po sostoyaniyu na 01.01.2002 g.: poyasnitel'naya zapiska* [Project of permanent conditions for calculating clay reserves at the Gaidukovka deposit of OJSC "Keramin" in Minsk District, Minsk Region, with reserve recalculation as of 01.01.2002: explanatory note]. Minsk, Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' Publ., NIRUP "Silikat" Publ., 2003, 333 p. (in Russian)
18. *Otchet o rezul'tatakh dopolnitel'nykh geologorazvedochnykh rabot po perevodu chasti zapasov kategorii C₂ v promyshlennyye kategorii na mestorozhdenii glin Gaidukovka Minskogo raiona i oblasti BSSR s podschyotom zapasov na 01.01.1984 g.: graficheskie prilozheniya* [Report on additional geological exploration works for transferring part of category C₂ reserves to industrial categories at the Gaidukovka clay deposit, with reserve calculation as of 01.01.1984: graphic appendices]. Minsk, Ministerstvo promyshlennosti stroitel'nykh materialov BSSR Publ., 1984, 5 sheets. (in Russian)
19. *Otchet o rezul'tatakh dopolnitel'nykh geologorazvedochnykh rabot po perevodu chasti zapasov kategorii C₂ v promyshlennyye kategorii na mestorozhdenii glin Gaidukovka Minskogo raiona i oblasti BSSR s podschyotom zapasov na 01.01.1984 g.: tekstovye prilozheniya* [Report on additional geological exploration works for transferring part of category C₂ reserves to industrial categories at the Gaidukovka clay deposit, with reserve calculation as of 01.01.1984: text appendices]. Minsk, Ministerstvo promyshlennosti stroitel'nykh materialov BSSR Publ., 1984, 210 p. (in Russian)
20. Awad A. M., Awadh S. M. Reserve estimation of Late Miocene Injana claystone beds for portland cement and brick industry, Middle of Iraq. *The Iraqi Geological Journal*, 2020, pp. 1–16.
21. Surface Difference (3D Analyst). URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/surface-difference.htm> (accessed October 26, 2025).
22. Yakushev A. A., Kindeev A. L. *Tryokhmernoe geostatisticheskoe modelirovanie zapasov glin na primere kar'era "Gaidukovka"* [Three-dimensional geostatistical modeling of clay reserves on the example of the "Gaidukovka" quarry]. *GIS-tekhnologii v naukakh o Zemle*, 2025, pp. 279–283. (in Russian)

Информация об авторах

Якушев Андрей Александрович – студент 4 курса, Белорусский государственный университет, (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: andryusha.yakushev.2004@gmail.com

Киндеев Аркадий Леонидович – кандидат географических наук, старший преподаватель, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: klarkhun@gmail.com

Information about the authors

Andrey A. Yakushev – 4th year student, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: andryusha.yakushev.2004@gmail.com

Arkady L. Kindeev – Ph. D. (Geography), Senior lecturer, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: klarkhun@gmail.com