

История зарождения и развития геоинформатики как науки

А.А. Тедикова¹, М.Д. Климоchenков^{1,2}, И.А. Мельниченко¹✉, М.А. Красноцветов^{1,3}, С.С. Ус¹, И.И. Кутлыев¹, М.В. Щёкина¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

² ПАО «Высочайший» (GV Gold), г. Москва, Российская Федерация

³ АО «УК «Кузбассразрезуголь» филиал «Талдинский угольный разрез», с. Красулино, р-н Новокузнецкий, Российская Федерация

✉ kors-ilay@mail.ru

Резюме: В статье рассмотрены основные причины возникновения такой науки, как геоинформатика, изложена концепция этой науки, описаны ее предмет и объект исследований, методы, система онтологий и задачи. Обоснована актуальность исследований в данном направлении. Статья состоит из нескольких разделов: «Зарождение науки и происхождение термина «геоинформатика», «История развития геоинформатики» и «Геоинформатика в России. Краткая история, проблемы и перспективы развития». В них последовательно раскрываются исторические события и элементы, оказавшие наибольшее влияние на современное состояние геоинформатики и как науки, и как прикладной дисциплины. Первая часть во многом посвящена различным подходам к определению слова «геоинформатика», а также ветвям и направлениям, на которые эта наука разделилась. Вторая часть – «История развития геоинформатики» – состоит из этапов, на протяжении которых геоинформатика формировалась. Эта часть сконцентрирована на открытиях и достижениях в сфере геоинформатики, ее связи с другими научными дисциплинами. Третья часть статьи освещает проблематику отечественных исследований, а также возможные направления развития. В заключение подведены итоги и результаты, собрана и кратко подана главная информация, рассмотренная во всей работе.

Ключевые слова: геоинформатика, геологическое обеспечение недропользования, обработка данных, нормирование данных, нейронные сети, цифровое месторождение

Для цитирования: Тедикова А.А., Климоchenков М.Д., Мельниченко И.А., Красноцветов М.А., Ус С.С., Кутлыев И.И., Щёкина М.В. История зарождения и развития геоинформатики как науки. *Горная промышленность*. 2024;(3):90–99. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-90-99>

The history of origin and development of geoinformatics as a science

A.A. Tedikova¹, M.D. Klimochenkova^{1,2}, I.A. Melnichenko¹✉, M.A. Krasnotsvetov^{1,3}, S.S. Us¹, I.I. Kutlyev¹, M.V. Shchekina¹

¹ National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

² Vysochayshiy PJSC (GV Gold), Moscow, Russian Federation

³ Coal Company Kuzbassrazrezugol JSC, Taldinsky Coal Mine, Krasulino settlement, Novokuznetskiy district, Russian Federation

✉ kors-ilay@mail.ru

Abstract: The article examines the main reasons for the emergence of geoinformatics as a science, outlines the concept of this science, describes its research subject and object, methods, ontology system and tasks. The relevance of studying this area is justified. The article comprises several sections: "Inception of the science and origin of the geoinformatics as the term", "History of geoinformatics development" and "Geoinformatics in Russia. Brief history, challenges and development prospects". They consistently reveal historical events and features that have had the greatest impact on the current state of geoinformatics both as a basic science and as an field of applied research. The first part is largely dedicated to different ways to define the "geoinformatics" as a term, as well as the branches and directions into which this science has divided. The second part, i.e. "History of geoinformatics development", describes the stages that shaped geoinformatics. This part focuses on discoveries and achievements in geoinformatics, its connection with other sciences. The third part of the article highlights the issues of domestic research, as well as possible directions of its development. The conclusion summarizes the results and outcomes, collects and provides a concise overview of the key information addressed in the paper.

Keywords: geoinformatics, geological support of subsoil use, data processing, data normalization, neural networks, digital deposit

For citation: Tedikova A.A., Klimochenkova M.D., Melnichenko I.A., Krasnotsvetov M.A., Us S.S., Kutlyev I.I., Shchekina M.V. The history of origin and development of geoinformatics as a science. *Russian Mining Industry*. 2024;(3):90–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-90-99>

Введение

В своей статье «Объяснение, редукция и эмпиризм» Пол Фейерабенд упоминает, что «появление новой теории изменяет взгляд как на наблюдаемые, так и на ненаблюдаемые свойства мира», объясняя такую позицию двумя идеями: научной теорией как методом мировосприятия, способным повлиять на убеждения, опыт и представление реальности, и противоположной ей, по которой научная теория должна быть проверяема, а также – устраняема, в том случае, если результаты проверки оказываются отличными от предсказанных [1, с. 29–32].

Геоинформатика зарождалась постепенно, через слияние других наук – наук о Земле и информатики. Возникновение геоинформатики в этом списке равносильно появлению новой теории, которая либо изменит наше понимание геологической информации, либо будет отвергнута, как неподтвержденная концепция.

Это одна из самых «молодых» наук, и ее расцвет пришелся на середину и конец XX в. – века науки и перемен. В своей книге «Геоинформатика» Иванников, Кулагин, Тихонов и Цветков (мб инициалы добавить) разделяют название этой науки на две составляющие: «гео», отвечающая за область исследований – за процессы, которые происходят на земной поверхности, и «информатика», которая указывает на происхождение отрасли знаний как на прикладную инженерную дисциплину, и определяет основной метод изучения объектов – при помощи компьютерных технологий [2, с. 3–5].

С одной стороны, классическая «информатика» характеризуется как отрасль науки, изучающая структуру и общие свойства информации, а с другой – обеспечивающая сбор, хранение, поиск, обработку, преобразование, распространение и использование ее в различных сферах деятельности.

Рост объема знаний о Земле (в том числе о минерально-сырьевых ресурсах), появление и развитие новых технологий и техник сбора, обработки и анализа информации предопределил слияние этих двух областей знаний и естественно родил термин «геоинформатика».

Потому возникновение геоинформатики многие связывают с необходимостью появления новых инструментов анализа геологической и картографической информации [3]. Так, появление новых дисциплин и отраслей знаний – естественный и закономерный процесс развития клас-

сических наук. С течением времени геоинформатика из сформированной другими науками отрасли развилась в самостоятельное учение, строящееся на собственных теориях и парадигмах. На этапе становления геоинформатики как науки произошло ее разделение на два направления: прикладное и фундаментальное [4]. В свою очередь, некоторые авторы (к примеру, А. Майоров) выделяют три ветви геоинформатики: теоретическую, прикладную и производственную [5].

Формирование направлений и ветвей геоинформатики происходило параллельно, с незначительными смещениями вперед у той или иной части относительно остальных. При этом геоинформатика как наука нередко воспринимается только через ее фундаментальное и теоретическое ответвления.

На всех этапах развития геоинформатики объектом ее исследований оставались пространственно распределенные данные: точки, значения тех или иных природных параметров и характеристик, геологические и географические единицы. Эти данные моделировались в комплексные системы, которые впоследствии использовались для хранения информации и прогнозирования возможных изменений.

Применимо к практике объектами исследований для геоинформатики стали различные картографические источники (общегеографические карты; карты природы, населения, экономики; политические, исторические и административные карты), статистические таблицы и данные, отчеты и тексты [6, с. 43].

В. Лайкин и Г. Упоров в своем учебном пособии «Геоинформатика» определяют предмет этой науки как «пространственно-временные информационные потоки естественно-географической среды», а ее метод как «пространственно-временное моделирование территориально-распределенных (географических) эмпирических (объективно существующих) систем любой природы с использованием соответствующих ГИС-технологий в различных научных и практических целях» [7, с. 15].

В предметной области геоинформатики выделяют специальную систему онтологий (моделей, подходов, описаний), которые отражают возможность «междисциплинарного переноса знаний и опыта» (иллюстрация приведена на рис. 1) [8].

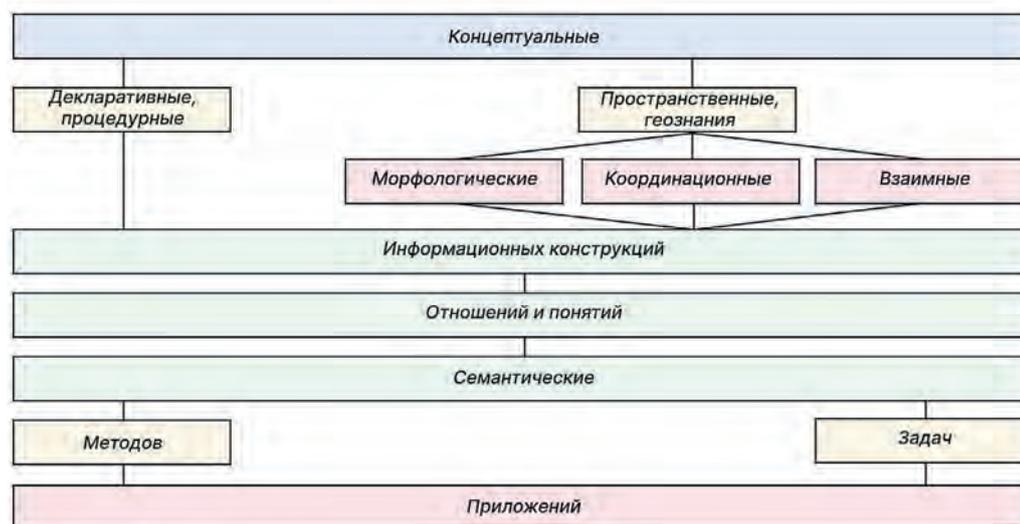


Рис. 1
Многоуровневая система онтологий в геоинформатике (авторская иллюстрация, основанная на иллюстрации из источника [8])

Fig. 1
A multi-tier ontology system in geoinformatics (author's illustration based on a figure from [8])

Как метод научного познания, геоинформационное моделирование представляется совокупностью процессов построения моделей и взаимодействия между ними и исследователем, их интерпретации и практического применения [9].

К задачам геоинформатики относят две основные группы: информационно-лингвистические и прикладные. Первые относятся к разработке «описательных моделей, которые формируют картину мира», вторые – к «проектированию, разработке, сопровождению систем, моделей, проектов и поддержке исследований в других научных направлениях» [10].

Зарождение, развитие и становление геоинформатики, ее интеграция с другими естественными науками и связь с ними, ветвление и разделение на направления – актуальная тема для современных исследований в геологической и горной отраслях. Значимость истории геоинформатики проявляется в необходимости познания истории суждений о природе недр и современных технологиях.

Зарождение науки и происхождение термина «геоинформатика»

А.А. Майоров, доктор технических наук и профессор «Московского государственного университета геодезии и картографии», посвятил значительную часть своих исследований темам геоинформатики, геоматики и геоданных. Так, в его статье «О развитии геоинформатики и геоматики» упоминается, что «геоинформатика и геоматика появились как следствия признания научным сообществом растущей потребности в пространственной информации для науки, практики и нового понимания Земли как сложной системы» [11]. При этом происхождение термина «геоинформатика» автор приписывает слиянию отраслей геодезии и информатики. Другие исследователи, к примеру Иванников, Кулагин, Тихонов и Цветков, разделяют название «геоинформатика» на составляющие «гео» и «информатика», не выделяя слова «геодезия». В свою очередь, некоторые авторы определяют возникновение понятия «геоинформатика» как фрагментарное заимствование из иностранных языков, где «информатика» – это научное направление, изучающее теорию методов хранения и анализа информации, а «гео» – часть слова «географический». Если рассматривать название термина с такой позиции, то оно является производным от словосочетания «географическая информатика»¹.

Несмотря на то что геоинформатика – одна из наиболее поздно зародившихся наук, а многие первооткрыватели, стоящие у ее истоков, до сих пор являются активными членами научного сообщества, расхождения возникают уже на этапе трактовки термина.

В данном контексте они напоминают нам случайных героев Дж. Свифта, непримиримо спорящих о том, с какой стороны разбивать яйцо: с тупого или острого конца? При этом игнорируя тот факт, что главное – разбить яйцо, и суть в самом яйце. Потому авторы склоняются к тому варианту, в котором слово «геоинформатика» разделяется на элементы «гео» (исходя из греческого *ge* – Земля) и «информатика», без конкретизации области геонаук, будь то геодезия, геология или география.

Объемное понятие «геоинформатика» включает в себя

несколько направлений или подходов, которые стали следствием развития этой науки. К дефинициям слова «геоинформатика» и подходам относят:

1. Научно-познавательный подход. При этом подходе термин «геоинформатика» трактуется как научная дисциплина, фокусирующаяся на изучении природных и экономических систем, их взаимном влиянии и структуре, с помощью моделирования (компьютерного и математического) на основе накопленных знаний, представленных базами данных. Основная цель геоинформатики в ключе научно-познавательного подхода – изучение этих систем и управление ими, их интеграция.

2. Технологический подход. При этом подходе геоинформатика – это не наука, а технология. Технология сбора и хранения данных, визуализации картографической и пространственно-распределенной информации. Цель такой технологии – обеспечение наиболее грамотного и корректного решения поставленной задачи автоматизированного подхода к управлению геосистемами.

3. Производственный подход. При этом подходе геоинформатика – не наука и технология, а производство и индустрия, специализирующаяся на изготовлении программных продуктов и аппаратных средств.

Каждый из подходов неразрывно связан с предыдущим – технологическая часть геоинформатики не может быть достигнута без теоретической базы, а производственные инструменты – разработаны без технологии и методики. В то же время на научный подход влияют результаты практического применения программного продукта – благодаря собранным данным могут быть скорректированы старые теории и выявлены новые.

История развития геоинформатики

В истории развития геоинформатики и ее подходов принято выделять четыре стадии, или периода. Наглядно они отображены на рис. 2.



Рис. 2 Основные стадии (периоды) развития геоинформатики (авторская иллюстрация, основанная на литературных источниках)

Fig. 2 The main stages (periods) of geoinformatics development (author's illustration based on literature sources)

1. Начальная стадия, или пионерный период (конец 1950-х – начало 1970-х годов). На этом этапе исследовались возможности, нарабатывался практический опыт, коллекционировались знания из смежных областей – информатики, геологии, картографии и др. Это длительный период, во многом повлиявший на современный облик геоинформатики как науки.

Большое влияние в этот период оказывают теорети-

¹ Геоинформатика: наука, технология, индустрия. Режим доступа: <https://scibook.net/sistemyi-geologii-geoinformatsionnyie/geoinformatika-nauka-tehnologiya-48112.html> (дата обращения: 08.08.2023).

ческие работы в области географии и пространственных взаимосвязей, а также становление количественных методов в географии в США, Канаде, Англии, Швеции (работы У. Гаррисона, Т. Хагерстранда, Г. Маккарти, Я. Макхарга)².

Наиболее ярким открытием пионерного периода считается разработанная под руководством Р. Томлинсона в 1963–1971 гг. первая геоинформационная система – Канадская ГИС (CGIS). Эта программа позволяла хранить геопространственные данные для их учета в кадастровом реестре Канады, а также помогала в разработке нормативных процедур для мониторинга ресурсов и управления землепользованием [12]. Программный продукт продолжал эксплуатироваться до вплоть до 1980-х годов, а сам Роджер Томлинсон был признан «отцом ГИС». Стоит отметить, что стоящий у истоков геоинформатики ученый был в первую очередь географом, что указывает на непосредственную связь между этими науками³.

Помимо канадских разработок, свой вклад в развитие геоинформатики и геоинформационных систем внесли и американские исследователи. Так, в середине 1960-х годов Говардом Фишером на базе Массачусетского технологического университета была основана Гарвардская лаборатория компьютерной графики и пространственного анализа. Эта лаборатория функционировала вплоть до начала 1991 г. и стала первооткрывателем многих методик разработки географических и картографических компьютерных систем. В конце пионерного периода (начальной стадии развития геоинформатики) лабораторией были представлены программы как для сбора данных, так и для двумерного и трехмерного моделирования, анализа и прогнозирования информации. Деятельность лаборатории называли «междисциплинарной» из-за сложной связи между информатикой и географией, которая и легла в основу выпущенного программного обеспечения.

Дана Томлин, автор научных трудов и профессор, работая именно в Гарвардской лаборатории, заложил основы картографической алгебры, описывающей работу с растровыми полями (картами) при помощи математических операций. Результаты его исследований изложены в труде «Географические информационные системы и картографическое моделирование», который на долгие годы стал базовой книгой для изучения сути геоинформатики⁴.

Гарвардская лаборатория доказала, что взаимодействие практики и теории – неразрывно. А в контексте современной эпохи диалектическое единство теории и практики – актуальная проблема, которая рассматривалась в трудах многих философов. Так, Карл Маркс в своих работах уделял значительное внимание тому, что необходимо не только объяснять мир (чем занимается теория), но и улучшать его, изменять в соответствии с открытыми законами (это то, за что отвечает практика). Фридрих Энгельс, в свою очередь, писал, что «все приобретаемые нами знания по необходимости ограничены и обусловлены теми обстоятельствами, при которых мы их приобретаем» [13, с. 302]. Это утверждение отражает недостаточность одной лишь теории в отрыве от практического опыта, несосто-

ятельность тех учений, что выведены в стерильном, вакуумном пространстве.

2. Срединная стадия, или период государственных инициатив (начало 1970-х – начало 1980-х гг.). Этот этап характеризуется развитием крупных геоинформационных проектов, которые поддерживались и одобрялись государствами стран, формированием проектных и исследовательских групп и институтов, специализирующихся на геоинформационных системах, продуктах и геоинформатике.

В конце 1960-х годов правительство Соединенных Штатов, наблюдая за успехом канадских коллег, сформулировало мнение о необходимости создания автоматизированных реестров и архивов, позволяющих отслеживать информацию, поступающую из Национального бюро переписей США. Данные, которые хранились на бумажных носителях, должны были быть оцифрованы и занесены в компьютерную систему для того, чтобы ускорить процесс их анализа и обработки. Так, задача переписи населения стала проблемой, решение которой представлялось возможным при помощи появившихся инструментов картографического моделирования. «География переписи» формулировалась как комплексная концепция, по которой жители разных штатов представлялись исследователям как точки, пространственно распределенные в соответствии с географическими данными. Был разработан специальный формат представления картографических данных DIME (Dual Independent Map Encoding), для которого были определены прямоугольные координаты перекрестков, разбивающих улицы всех населенных пунктов США на отдельные сегменты.

Несмотря на то что алгоритмы, методика и теоретические предпосылки были заимствованы из исследований ученых Гарвардской лаборатории, американские ученые усовершенствовали и модернизировали существующие подходы, а в их разработке был впервые применен топологический подход к организации управления географической информацией, который содержал математический способ описания пространственных взаимосвязей между объектами.

Появление этого подхода вкпе с государственной поддержкой разработок, направленных на развитие геоинформатики и ГИС-систем, привело к увеличению количества экспериментальных работ в этой области. Появились первые практические результаты в индустрии навигационных систем общего пользования и цифровых городских карт.

Параллельно с задачей переписи населения, или «географией переписи», в американском институте исследования систем окружающей среды (ESRI) шла поэтапная разработка моделей пространственных данных (растровых и векторных систем) на базе теоретических идей и методов, также разработанных в Гарвардской лаборатории и других организациях. Основанная Джеком Дэнджермондом компания (название «институт» – формальное, фирма была и остается частной) стала лидером в области производства геоинформационных систем. Среди программ, которые ESRI предоставляет пользователям, комплексы геоинформационных продуктов ArcGIS и ArcView, работа в которых активно ведется и по сей день, в том числе – в странах СНГ [14]. Широкие массы получили доступ к этим компьютерным программам на следующем этапе развития геоинформатики – в пользовательский период.

В середине 1970-х годов зародилась шведская школа ге-

2 История развития геоинформационных систем. Информационно-образовательные ресурсы ГАГУ. Режим доступа: <https://e-lib.gasu.ru/eposobia/gis/2.html> (дата обращения: 15.10.2022).

3 Roger Tomlinson: The father of computerized cartography. Available at: <https://www.theglobeandmail.com/technology/science/roger-tomlinson-the-father-of-computerized-cartography/article17185506/> (accessed: 17.08.2023).

4 C. Dana Tomlin, Professor Emeritus of Landscape Architecture. Weitzman school of Design Available at: <https://www.design.upenn.edu/landscape-architecture/people/c-dana-tomlin> (accessed: 22.10.2022).

оинформатики, исследования которой формировались на фундаментальных статьях, написанных географами Университета Лунда О. Саломонссоном и Т. Германсенем, а базировались эти статьи на разработанной в Швеции ГИС-системе для учета земельной документации⁵. Как и в случае с канадским опытом, появление научного обоснования для геоинформатики было продиктовано практической задачей кадастрового и земельного учетов. Отечественный читатель мог узнать о западных наработках из сборника «Новые идеи в географии» (отв. ред. В.М. Гохман и Ю.В. Медведков) – одной из немногих коллекций статей, освещающих проблемы геоинформатики в советском пространстве.

С расширением сферы влияния геоинформатики, обновлением теоретической базы и введением строго математического подхода к созданию геоинформационных программ были выявлены традиционные составляющие ГИС (геоинформационных систем). Уже на этой стадии ГИС формировались как комплексные решения, сочетающие в себе несколько подходов, – подробная схема приведена на рис. 3.



Рис. 3
Классические составляющие геоинформационных систем (авторская иллюстрация, основанная на иллюстрации из источника: Roger Tomlinson: The father of computerized cartography. Available at: <https://www.theglobeandmail.com/technology/science/roger-tomlinson-the-father-of-computerized-cartography/article17185506/> (accessed: 17.08.2023))

Fig. 3
Classical components of geoinformation systems (author's illustration based on a figure from: Roger Tomlinson: The father of computerized cartography. Available at: <https://www.theglobeandmail.com/technology/science/roger-tomlinson-the-father-of-computerized-cartography/article17185506/> (accessed: 17.08.2023))

Так, этот период ознаменовался развитием фундаментальных принципов и законов геоинформатики, формулированием основных особенностей и понятий этой науки, получением важнейших законов и положений.

3. Современная стадия, или пользовательский период (конец 1980-х годов – настоящее время). Предшествующие этапы стали отправной точкой для массового применения геоинформационных систем и наиболее яркого развития геоинформатики как науки.

На пользовательском периоде наиболее значимую

роль в повышении заинтересованности геоинформатикой сыграло развитие сети «Интернет» – информация и программные продукты стали ближе и доступнее для научных сотрудников, работников частных и государственных компаний, студентов. С распространением пользовательских компьютеров, улучшением их качества, повышением доступности, начал насыщаться рынок ГИС-систем, расширилась область их применения и число пользователей.

Несмотря на то что в Советском Союзе, а позднее – в Российской Федерации геоинформатика и геоинформационные системы развивались медленнее, чем на Западе, на сегодняшний день наблюдается значительный рост заинтересованности в этой отрасли.

Геоинформатика, основы которой были заложены исходя из положений информатики и наук о Земле, а также картографической алгебры, появившейся позднее, на современном этапе развития разделилась на несколько специализированных направлений:

- Общая геоинформатика. Базовая отрасль геоинформатики, занимающаяся исследованием фундаментальных проблем и задач теории [15].
- Геоинформатика транспорта. Направление геоинформатики, цель которого – изучение и практическое применение технологий контроля состояния пути, проектирования и строительства на основе мобильного лазерного сканирования, интегрированного с геоинформационными системами [16]. Экспериментальные исследования, которые проводились при помощи инструментария геоинформатики транспорта, позволили не только смоделировать существующие дорожные системы, но и проанализировать их отображение на карте в соответствии с характеристиками времени, а также учесть и спланировать изменения дорожного полотна [17].
- Экологическая геоинформатика. Составляющая науки геоинформатики, направленная на решение проблем, связанных с окружающей средой. Это набор современных и усовершенствованных методов, который может применяться для контроля и прогнозирования стихийных бедствий, картирования и мониторинга элементов окружающей среды, комплексного управления прибрежными районами, управления природными ресурсами и т. д. [18].
- Космическая геоинформатика. Раздел геоинформатики, отвечающий за исследование космического пространства интегрированными методами различных научных направлений – геоинформатики, технологий дистанционного зондирования земли, геодезической астрономии, космической фотограмметрии, обработки радиолокационных и тепловых снимков [19]. В космическом геоинформационном моделировании используется набор методов, одновременно схожий и отличный от техник, которые применяются при моделировании земных объектов. Так, ключевое сходство заключается в использовании технологии геоинформационного мониторинга (наблюдения за большим количеством данных и их анализ), а различия – в форме представления информации (для космической геоинформатики пространство представляется набором вложенных пространств: дальний космос, ближний

⁵ Геоинформатика. Фонд знаний «Ломоносов» Режим доступа: <http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:01337:article> (дата обращения: 23.08.2023).

космос, солнечная система, залунное пространство, подлунное пространство и околоземное космическое пространство) [20].

С развитием геоинформатика постепенно из прикладной дисциплины, источники которой восходят к слиянию других учений, стала самостоятельной наукой о пространстве, данных и их изменении во времени. Она обрела собственные направления, значительный пласт теоретической базы, влиятельных ученых и последователей.

Геоинформатика на современной стадии – это наука о свойствах геоинформации, ее закономерностях, методиках поиска и изучения данных о природных явлениях и объектах.

4. Финальная стадия, или коммерческий период (конец 1980-х годов – настоящее время). Параллельно современной стадии выстраивался период, названный «коммерческим». Этот временной промежуток, начавшийся в конце прошлого столетия и длящийся до сих пор, характеризуется возросшим спросом на прикладные достижения геоинформатики, программные комплексы и системы, разработанные при помощи теории этой науки.

На финальной стадии в США появляется подтверждение значимости геоинформатики на государственном уровне. Так, в 1994 г. было утверждено правительственное распоряжение под названием «Координация в области получения и доступа к данным: Национальная инфраструктура пространственных данных» [21]. А пространственные данные – это в первую очередь объект исследований геоинформатики и геоинформационных систем.

В Российской Федерации такие подтверждения появились позднее, в 2013 г. (также после постановления правительства). Федеральным научно-техническим центром геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных был создан фонд пространственных данных, оцифрованы и представлены пользователям и ученым сеть геодезических станций и каталог географических названий⁶.

Коммерческий период характеризуется государственной поддержкой в сочетании с экономическими потребностями рынка геоинформационных систем.

Так, современные ученые выделяют три направления рынка геоинформационных систем, имеющихся на сегодняшний день: данные дистанционного зондирования, навигация и геодезия. В рамках исследований проводились опросы экспертов, анализ открытых данных, расчет затрат и закупок, а также обзор вузов, подготавливающих специалистов в данной отрасли. Были выявлены тенденции роста рынка, увеличения количества разрабатываемого программного обеспечения и повышения качества обучения в высших учебных заведениях [22].

Геоинформатика в России:

краткая история, проблемы и перспективы развития

При проведении общей оценки уровня развития геоинформатики в 1960–1970-х годах некоторые исследователи утверждают, что в нашей стране осознание ее роли в системе наук пришло позднее, чем у западных ученых. Так, свое развитие в Советском Союзе геоинформатика получила лишь с появлением первых ведущих центров и научных лабораторий [23]. Но при

этом не учитывались наработки в оборонной отрасли.

В СССР первые практические и теоретические наработки появились ненамного позднее, чем в других государствах, и по качеству мало уступали иностранным работам. В 1970-х годах в Нижегородском НИИ прикладной математики и картографии (НИИПМК) была разработана «методология, заложенная в технологии создания твердых копий топографических карт различных масштабов для Роскартографии». Она позволяла за короткое время на новой компьютерной базе создать автоматизированную картографическую систему и во многом превосходила появившееся ранее методики [24].

В.С. Тикун, российский ученый-картограф и доктор географических наук, отмечал, что опыт геоинформатики на территориях постсоветского пространства во многом был связан с адаптацией зарубежных технологий. При этом исследования проводились во многих городах: Владивосток, Уфа, Москва, Казань, Тобольск и др. В 1980-х годах осуществлялись исследования по пространственному анализу, картографо-математическому моделированию, тематическому картографированию и их автоматизации, проводились теоретическое обоснование и разработка первых геоинформационных систем. А первой отечественной геоинформационной системой считается разработанная в 1986 г. Н.Л. Беручишвили, физико-географом и ландшафтоведом, геоинформационная система Марткопского физико-географического стационара тбилисского университета.

При этом после распада СССР геоинформационные исследования в России некоторое время сдерживались отсутствием открытых данных. В них не было явной практической необходимости – место на рынке завоевали иностранные программы. И только в последние два десятилетия, благодаря государственной инициативе, появились достойные ответы на вопросы, поставленные геоинформатикой как прикладной дисциплиной. Был разработан и успешно функционирует следующий ряд программ: Единое геоинформационное пространство г. Москвы, Региональная геоинформационная система Московской области, Геоинформационная система Санкт-Петербурга, Региональная инфраструктура на территории Калужской области, ГИС в территориальном планировании Ростовской области и многие другие [25].

Сегодня в экономике России, в научном сообществе и в образовательной сфере геоинформатика занимает одну из ключевых позиций. Только за последние 5 лет состоялся ряд конференций, посвященных проблемам геоинформатики и геоинформационным системам, среди которых такие мероприятия, как научно-практическая конференция «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем» (2017 г.), международная научно-техническая конференция «Пространственные данные как основа развития цифровой экономики России» (2018 г.) и др. [26]

В настоящее время силами ученых университета МИСИС геоинформатика развивается в различных направлениях: как инструмент при построении моделей горно-геологических информационных систем предприятий для мониторинга событий и планирования [27], для компьютерного моделирования систем управления информационной безопасностью геоинформационных технологий [28], мониторинга инцидентов безопасности [29]. Немаловажен и вклад геоинформатики как науки для современного состояния нейросетевого моделирования геологиче-

⁶ Историческая справка об учреждении. Официальный сайт «Федерального научно-технического центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» Режим доступа: <https://cgkpd.ru/about-us/history/> (дата обращения: 12.08.2023).

ских объектов. Так, использование геоинформационных программных комплексов и геостатистической обработки исходных данных позволяет выявить закономерности в распределении полезного компонента в рудном теле, обучить модель и провести оценку и анализ результатов [30]. В свою очередь, такие модели содержания полезного компонента способны в значительной степени упростить интерпретацию геологической информации и снизить временные затраты при оценке запасов [31].

Но несмотря на повышение качества и количества исследований и наработок в сфере геоинформатики из-за отставания на ранних этапах развития этой науки современная Россия временно не может претендовать на лидирующую позицию как в части исследований, так и в сегменте производства программных продуктов. Решение этой проблемы может быть достигнуто увеличением числа лабораторий и учебных программ, освещающих основы теоретической геоинформатики и ее прикладной значимости. Причем в этом аспекте основную роль должно играть накопление всеобъемлющей информации об объектах моделирования.

В силу того что геоинформатика – относительно «молодая» наука, это направление перспективно для исследований. Сфер и отраслей, в которых может быть применен инструментарий геоинформатики (помимо классического их использования в геологии и картографии), много: энергетика [32], кадастровый инжиниринг, языкознание, транспорт [33] и многие другие. Поэтому отечественные исследования, проводимые в рамках этой науки, на долгие годы смогут сохранить свою необходимость и актуальность, что характеризует развитие геоинформатики как одной из самых проблемно-ориентированных наук.

Важными темами для изучения и проведения исследований в сфере геоинформатики на сегодняшний день являются различные аспекты моделирования и вовлечения

в отработку техногенных месторождений, характеризующихся сложным пространственным распределением полезных компонентов и неявными зависимостями между содержаниями тех или иных элементов. Одной из ключевых особенностей моделирования объектов подобного – искусственного – происхождения является необходимость задействования специфического математического аппарата и значительных программных мощностей.

Применение искусственного интеллекта для решения задач геологии и горного дела также нашло свое отражение в современных подходах к геоинформатике. Нейросетевое программирование с каждым днем становится все более доступным, а концепт обучаемых моделей для прогнозирования и оценки свойств минерального сырья – более необходимым. Так, ученые из университета МИСИС уже сегодня разрабатывают модели искусственных нейронных сетей для геомоделирования границ литологических разностей [34].

Заключение

Геоинформатика, зародившаяся намного позже, чем другие науки, менее чем за век своего существования стала не только прикладной и инженерной дисциплиной, но и отраслью знаний, которая характеризуется своими постулатами, законами, теоремами и аксиомами. Ее развитие не было линейным – в истории геоинформатики прослеживаются как взлеты, так и периоды застоя.

В статье отражена краткая и полная хронология событий, связанных с геоинформатикой и геоинформационными системами. Также было приведено деление времени на различные этапы развития геоинформатики. Эти этапы (стадии) и наиболее значимые открытия, происшедшие в выявленные временные интервалы, дополнительно проиллюстрированы на рис. 4.

По прошествии лет геоинформатика заняла свое место

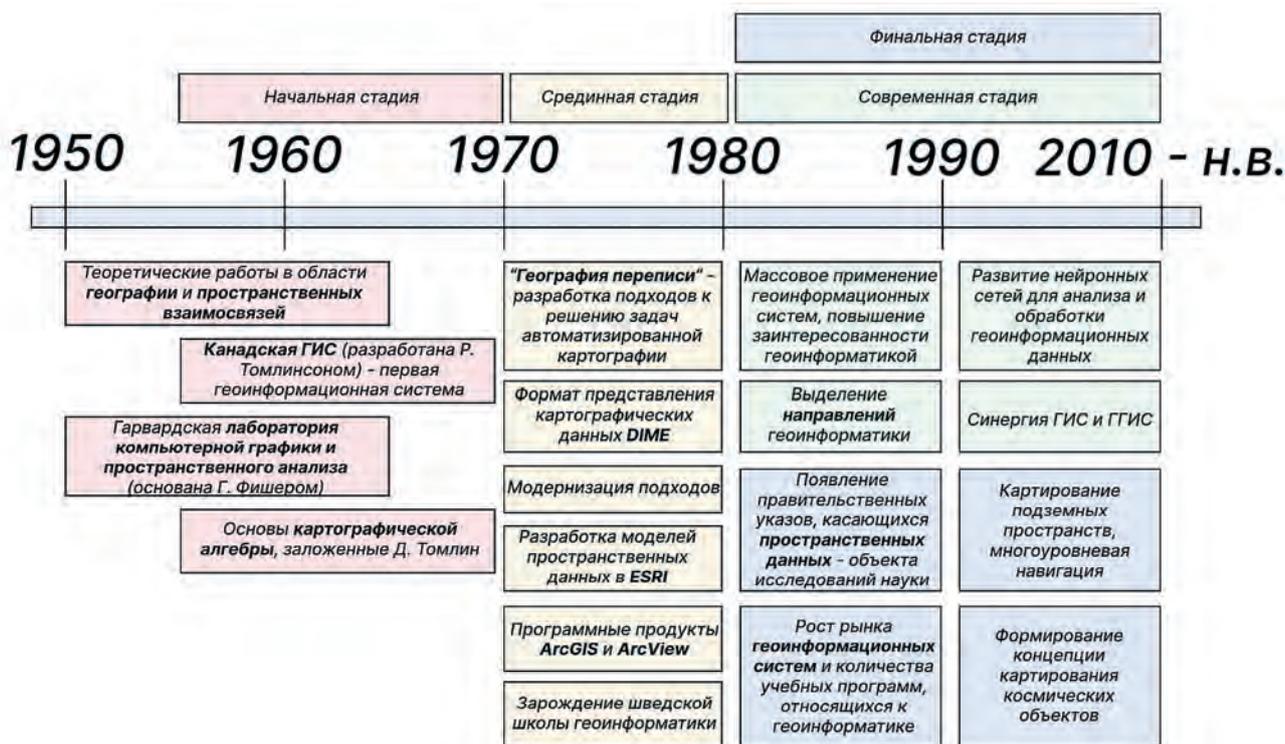


Рис. 4 Стадии развития геоинформатики (авторская иллюстрация, основанная на собранной информации)

Fig. 4 Stages of geoinformatics development (author's illustration based on collected information)

в списке наук. Появились дисциплины в университетах, государственная поддержка отдельных программ, связанных с геоинформатикой, лаборатории и научные центры. Были рассмотрены все вышеперечисленные аспекты и выделены в отдельную главу исторические события, а также проблемы и перспективы развития геоинформатики в России.

Как наука, на раннем этапе становления сложившаяся из геологии, картографии, геодезии и информатики, геоинформатика стала той интегрированной отраслью знаний, что соединила в себе лучшие открытия своих предшественников. Методов, которыми оперирует геоинформатика, – множество, но в силу позднего зарождения этой науки большая часть из них только будет разработана и открыта.

Проблемы, которые могут возникнуть при дальнейшей эволюции геоинформатики, напрямую связаны с тем, насколько прикладная это наука. Геоинформатика не может существовать без геоинформационных систем и программных продуктов, которые в капиталистическом

мире стали рычагом коммерциализации науки. С одной стороны, практическое применение диктует спрос на исследования, с другой – влияет на их качество. Сегодня геоинформатика ассоциируется в основном с теми геоинформационными ресурсами, которые она предлагает, а не с теоретическими основами. Для того чтобы не допустить превращения геоинформатики в исключительно прикладную отрасль, зависимую от экономики, требуется как международное взаимодействие ученых, так и всесторонняя государственная поддержка.

Для каждого исследователя, который планирует посвятить свои работы геоинформатике, важно ознакомиться с ее теоретическими и историческими основами, так как они определяют восприятие геоинформатики, ее проблем и законов функционирования. Представленная необходимая и достаточная информация для того, чтобы сформировать мнение о месте геоинформатики среди наук, ее социальной, экономической и научной значимости.

Вклад авторов

А.А. Тедикова – генерация идеи исследования, постановка задачи исследования и получение данных для анализа.

М.Д. Климоchenков – выполнение работы по систематизации материала, написание текста статьи.

И.А. Мельниченко – анализ результатов исследований и подготовка материала к публикации.

М.А. Красноцветов – анализ литературных источников и редактирование текста статьи.

С.С. Ус – подготовка иллюстраций к статье, координация и планирование исследования.

И.И. Кутлыев – постановка вопросов исследования, составление методологии.

М.В. Щёкина – редактирование текста статьи.

Authors' contributions

Anita A. Tedikova – generating the research idea, setting the research problem and obtaining data for analysis.

Maxim D. Klimochenkov – performing work on systematization of the material, writing the text of the article.

Iliia A. Melnichenko – analyzing the research results and preparing the material for publication.

Maxim A. Krasnotsvetov – analyzing literary sources and editing the text of the article.

Semen S. Us – preparation of illustrations for the article, coordination and planning of the research.

Ildan I. Kutlyev – formulating the research questions, drafting the methodology.

Marina V. Shchekina – editing the text of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы / References

1. Фейерабенд П. *Избранные труды по методологии науки*. М.: Прогресс; 1986. 542 с.
2. Иванников А.Д., Кулагин В.П., Тихонов А.Н., Цветков В.Я. *Геоинформатика*. М.: МАКС Пресс; 2001. 349 с.
3. Широков Р.С. История создания ГИС. В кн.: *Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН: сб. тр. годичной научной конференции*. М.; 2002.
4. Бутко Е.Я. Геоинформатика как метод познания. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2016;(5):56–62. Butko E.Ya. Geoinformatics as method of cognition. *Educational Resources and Technologies*. 2016;(5):56–62. (In Russ.)
5. Maiorov A. Modern development of geoinformatics. *European Researcher*. 2014;82(9-1):1620–1626. <https://doi.org/10.13187/er.2014.82.1620>
6. Тискунова В.С. *Основы геоинформатики*. М.: Издательский центр «Академия»; 2004. 345 с.
7. Лайкин В.И., Упоров Г.А. *Геоинформатика*. Комсомольск-на-Амуре: Издательство АмГПУ; 2010. – 160 с.
8. Розенберг И.Н. Онтологический подход в геоинформатике. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2016;(5):86–91. Rosenberg I.N. The ontological approach geoinformatics. *Education Resources and Technologies*. 2016;(5):86–91. (In Russ.)
9. Розенберг И.Н. Геоинформационное моделирование как фундаментальный метод познания. *Перспективы науки и образования*. 2016;(3):12–15. Режим доступа: https://pnojurnal.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/05/pdf_160302.pdf (дата обращения: 03.03.2024). Rozenberg I.N. Geoinformation modeling as a fundamental method of cognition. *Perspectives of Science & Education*. (In Russ.) Available at: https://pnojurnal.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/05/pdf_160302.pdf (accessed: 03.03.2024).

10. Савиных В.П. Геоинформатика в системе наук. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2016;(3):106–112. Savinykh V.P. Geoinformatics in the system sciences. *Education Resources and Technologies*. 2016;(3):106–112. (In Russ.)
11. Майоров А.А. О развитии геоинформатики и геоматики. *Перспективы науки и образования*. 2015;(1):63–69. Режим доступа: https://pnojournal.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/12/pdf_150110.pdf (дата обращения: 03.03.2024). Maiorov A.A. About development geoinformatics and geomatics. *Perspectives of Science & Education*. (In Russ.) Available at: https://pnojournal.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/12/pdf_150110.pdf (accessed: 03.03.2024).
12. Bower S.S. Tools for rational development: The Canada land inventory and the Canada geographic information system in mid-twentieth century Canada. *Scientia Canadensis*. 2018;40(1):44–75. <https://doi.org/10.7202/1048925ar>
13. Маркс К., Энгельс Ф. *Сочинения*. 2-е изд. М.: Типография №1 «Печатный Двор»; 1961. Т. 21. 745 с.
14. Docan D.C. *Learning ArcGIS for Desktop*. Birmingham: Packt Publishing; 2016. 25 p.
15. Цветков В.Я. Эволюция геоинформатики. *Вектор ГеоНаук*. 2022;(5):53–63. <https://doi.org/10.24412/2619-0761-2022-2-53-63> Tsvetkov V.Ya. The evolution of geoinformatics. *Vector of Geosciences*. 2022;(5):53–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2619-0761-2022-2-53-63>
16. Андреева А.О. *Разработка методики геоинформационного моделирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта: дис. ... канд. техн. наук*. М.; 2021. 218 с.
17. Еремеев С.В., Егай М.В., Абакумов А.В. Геоинформационная технология для планирования и учета дорожного покрытия. *Геоинформатика*. 2022;(2):18–24. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2022-2-18-24> Eremeev S.V., Egai M.V., Abakumov A.V. Geoinformation technology for road surface planning and accounting. *Geoinformatika*. 2022;(2):18–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2022-2-18-24>
18. Mondal B.K. *West Bengal: Geoinformatics for Sustainable Environment Management*. Salt Lake City: Netaji Subhas Open University; 2018. Vol. 2. 238 p.
19. Господинов С.Г. Геодезическая астрономия и космическая геоинформатика. *Наука и технологии железных дорог*. 2017;(1):45–50. Gospodinov S.G. Geodetic astronomy and space geoinformatics. *Nauka i Tekhnologii Zheleznikh Dorog*. 2017;(1):45–50. (In Russ.)
20. Савиных В.П. Геоинформационное моделирование в космических исследованиях. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2017;(3):109–117. Savinykh V.P. Geoinformation modeling in space researches. *Education Resources and Technologies*. 2017;(3):109–117. (In Russ.)
21. Лобанов А.А. Инфраструктура пространственных данных как ресурс управления. *Государственный советник*. 2014;(4):76–81. Режим доступа: <https://gossovetnik.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/12/140412.pdf> (дата обращения: 03.03.2024). Lobanov A.A. Spatial data infrastructure as a resource management. *The State Counsellor*. 2014;(4):76–81. (In Russ.) Available at: <https://gossovetnik.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/12/140412.pdf> (accessed: 03.03.2024).
22. Дыба С.Е., Чернова И.В. Рынок геоинформационных продуктов и услуг в России. *Наука. Инновации. Технологии*. 2019;(4):173–184. Режим доступа: <https://scienceit.elpub.ru/jour/article/view/42/0> (дата обращения: 03.03.2024). Dyba S.E., Chernova I.V. Geographic information products and services market in Russia. *Science. Innovations. Technologies*. 2019;(4):173–184. (In Russ.) Available at: <https://scienceit.elpub.ru/jour/article/view/42/0> (accessed: 03.03.2024).
23. Кошкарев А.В. О ранней истории дальневосточной геоинформатики и тематической картографии. *Тихоокеанская география*. 2021;(3):43–50. https://doi.org/10.35735/26870509_2021_7_43 Koshkarev A.V. On the early history of far eastern geoinformatics and thematic mapping. *Pacific Geography*. 2021;(3):43–50. (In Russ.) https://doi.org/10.35735/26870509_2021_7_43
24. Балавина Н.В., Нечаев А.М., Гончаров С.В. *Геоинформационные системы и их применение*. М.: Издательский дом Академии Естествознания; 2018. 236 с.
25. Дупленко А.Г. Этапы и тенденции развития геоинформационных систем. *Молодой ученый*. 2015;(9):115–117. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/89/18321/> (дата обращения: 03.03.2024). Duplenko A.G. Stages and trends in the development of geoinformation systems. *Molodoy Uchenyi*. 2015;(9):115–117. (In Russ.) Available at: <https://moluch.ru/archive/89/18321/> (accessed: 03.03.2024).
26. Кошкарев А.В. Место геоинформатики в цифровой экономике России. В кн.: *Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019): сб. тр. Всерос. конф. с междунар. участием, г. Бердск, 26–30 авг. 2019 г.* Новосибирск: Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН; 2019. С. 384–388.
27. Гончаренко С.Н., Лачихина А.Б. Построение модели горно-геологической информационной системы промышленного предприятия в защищенном исполнении. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(6):39–55. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2023/6/2023_06_39-55.pdf (дата обращения: 03.03.2024). Goncharenko S.N., Lachihina A.B. Modeling protected geological and geotechnical information system in mining industry. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(6):39–55. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2023/6/2023_06_39-55.pdf (accessed: 03.03.2024).
28. Гончаренко С.Н., Яхеев В.В. Компьютерное моделирование корпоративной системы информационной безопасности геоинформационных технологий промышленного предприятия. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(2):81–96. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_81 Goncharenko S.N., Yakheev V.V. Computer modeling of corporate information security of geoinformation technologies at industrial facilities. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(2):81–96. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_81

29. Гончаренко С.Н., Лачихина А.Б. Мониторинг инцидентов безопасности геоинформационной системы управления и контроля деятельности промышленного предприятия. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(3):108–116. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_3_0_108
Goncharenko S.N., Lachihina A.B. Monitoring of geoinformation system security incidents in performance supervision and management in industry. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(3):108–116. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_3_0_108
30. Бондаренко И.С. Нейросетевое моделирование геологического поля месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(6):19–38. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2023/6/2023_06_19-38.pdf (дата обращения: 03.03.2024).
Bondarenko I.S. Neural network modeling of geological field of mineral deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(6):19–38. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2023/6/2023_06_19-38.pdf (accessed: 03.03.2024).
31. Кожухов А.А., Омельченко Д.Р., Мельниченко И.А., Ческидов В.В., Мосейкин В.В. Создание модели распределения полезного компонента в железорудном месторождении. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(8):5–17. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2023/8/08_2023_5-17.pdf (дата обращения: 03.03.2024).
Kozhukhov A.A., Omelchenko D.R., Melnichenko I.A., Cheskidov V.V., Moseykin V.V. Modeling mineral component distribution in iron ore deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(8):5–17. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2023/8/08_2023_5-17.pdf (accessed: 03.03.2024).
32. Шакун В.П., Рафикова Ю.Ю., Киселева С.В. Применение открытых ГИС-инструментов к разработке карт ресурсов и доступности территорий для объектов солнечной и ветровой энергетики. В кн.: *Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф., Майкоп, 17–21 мая 2021 г.* Майкоп: ИП Кучеренко Вячеслав Олегович; 2021. Часть 2. С. 164–169.
33. Максимова В.Н., Шестакова Л.И. (ред.) *Геоинформационные системы в управлении: сб. тр. науч.-практ. семинара Научно-образовательного центра «Геоинформационные системы», г. Челябинск, 20 февр. 2017 г.* Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2017. 97 с.
34. Мельниченко И.А. *Трехмерное геомоделирование границ литологических разностей железорудных месторождений на основе пространственно-координированных данных: дис. ... канд. техн. наук. М.; 2021.* 209 с.

Информация об авторах

Тедикова Анита Аркадьевна – аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0008-3343-280X>; e-mail: anita_t@inbox.ru

Климоченков Максим Дмитриевич – старший специалист производственно-технического отдела, ПАО «Высочайший» (GV Gold); аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0001-1276-9285>; e-mail: klimochenkov98@mail.ru

Мельниченко Илья Ашотович – кандидат технических наук, старший преподаватель, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0205-6425>; e-mail: kors-ilya@mail.ru

Красноцветов Максим Александрович – главный геолог АО «УК «Кузбассразрезуголь» филиал «Талдинский угольный разрез»; аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0001-1615-574X>; e-mail: maxim.krasnotsvetov@gmail.com

Ус Семён Сергеевич – аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3784-1957>; e-mail: iltarques@gmail.com

Кутлыев Ильдан Иванович – аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0005-3452-9724>; e-mail: ildankutlyev@mail.ru

Щёкина Марина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0007-2684-450X>; e-mail: mshchekina@mis.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.04.2024

Поступила после рецензирования: 16.05.2024

Принята к публикации: 30.05.2024

Information about the authors

Anita A. Tedikova – Postgraduate Student, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0008-3343-280X>; e-mail: anita_t@inbox.ru

Maxim D. Klimochenkov – Senior Specialist of Production and Technical Department, Vysochayshiy PJSC (GV Gold), Postgraduate Student, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0001-1276-9285>; e-mail: klimochenkov98@mail.ru

Ilya A. Melnichenko – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0205-6425>; e-mail: kors-ilya@mail.ru

Maxim A. Krasnotsvetov – Chief Geologist, Coal Company Kuzbassrazrezugol JSC, Taldinsky Coal Mine, Krasulino settlement, Novokuznetskiy district, Russian Federation; Postgraduate Student, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0001-1615-574X>; e-mail: maxim.krasnotsvetov@gmail.com

Semen S. Us – Postgraduate Student, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3784-1957>; e-mail: iltarques@gmail.com

Ildan I. Kutlyev – Postgraduate Student, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0005-3452-9724>; e-mail: ildankutlyev@mail.ru

Marina V. Shchekina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0007-2684-450X>; e-mail: mshchekina@mis.ru

Article info

Received: 13.04.2024

Revised: 16.05.2024

Accepted: 30.05.2024