



Научная статья
УДК 622.3+504.5+912.43
EDN: UKAGXU
DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-6



Пространственно-временное распределение элементов в техногенных почвах Ковыктинского газоконденсатного месторождения

Д.И. Пыжьянов^{a,✉}, Г.И. Сарапулова^b

^{a,b}*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация*

Резюме. Цель проведенного исследования заключалась в выявлении характера пространственно-временного распределения тяжелых металлов и мышьяка на территории газоконденсатного месторождения за период 2019–2025 гг. Динамика повышения содержаний по годам для марганца, мышьяка, никеля с превышением ориентировочно допустимых концентраций позволила наглядно оценить зависимость между интенсивностью освоения территории в зоне добычи газа и уровнем негативного воздействия в виде поступления этих элементов в почву. В соответствии с задачами проведен критический анализ всех промзвудов на площадке с позиции потенциального поступления загрязняющих веществ в почвенный слой, получены коэффициенты накопления элементов относительно мировых кларков по Виноградову. Так, обнаружен повышенный коэффициент накопления мышьяка, марганца, никеля ($K_k \geq 1,5$). Геоэкологические процессы техногенеза в районе газоконденсатного месторождения сопровождаются формированием ореолов загрязнения почв, что определено посредством геоинформационных систем технологий. Геохимические показатели почв как индикаторы их состояния отражают высокую функциональность в условиях негативного воздействия при добыче газа и реально оценивают геоэкологическую обстановку на месторождении. Показано, что пространственное распределение марганца, никеля преимущественно связано с технологическими процессами, регулярными производственными работами и сваркой. Превышение же содержаний мышьяка может быть обусловлено наследованием геолого-геохимической особенности Прибайкальской природной территории с повышенным содержанием этого металлоида в составе привозного грунта для планировки территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения. Таким образом, интеграция геоинформационных систем технологий с результатами геохимических исследований является эффективным инструментом комплексной геоэкологической оценки территории в зоне техногенеза и служит основой для создания эффективного современного объектно-ориентированного мониторинга в зоне газоконденсатного месторождения.

Ключевые слова: газоконденсатное месторождение, промплощадка, куст газовых скважин, почва, геохимические параметры, тяжелые металлы, геоинформационная система

Для цитирования: Пыжьянов Д.И., Сарапулова Г.И. Пространственно-временное распределение элементов в техногенных почвах Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 72–83. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-6>. EDN: UKAGXU.

Original article

Spatiotemporal distribution of elements in technogenic soils of Kovykta gas condensate field

Daniil.I. Pyzhianov^{a,✉}, Galina I. Sarapulova^b

^{a,b}*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. The purpose of the conducted study was to identify the spatial and temporal distribution of heavy metals and arsenic in a gas condensate field for the period from 2019 to 2025. The annual increase in manganese, arsenic, and nickel concentrations exceeding the estimated permissible concentrations allowed for a clear assessment of the relationship between the intensity of development in the gas production zone and the level of negative impacts from the release of these elements into the soil. In accordance with the objectives, a critical analysis of all production units on the industrial site was conducted to assess the potential for pollutants to enter the soil. The coefficients of element accumulation were obtained relative to the global clarks according to Vinogradov. Thus, arsenic, manganese, and nickel showed an increased accumulation coefficient of $K_k \geq 1.5$. Geoecological processes associated with technogenesis in the area of the gas condensate field are accompanied by the formation of soil contamination halos, which was determined using geoinformation system technologies. Geochemical parameters of soils, as indicators of their conditions, reflect high functionality under the adverse impacts of gas production and provide a realistic assessment of the geoecological situation at the field. It is shown that the spatial distribution



of manganese and nickel elements is primarily related to technological processes, regular production works and welding. The excessed contents of arsenic may be due to the inherited geological and geochemical features of the Baikal natural territory with the elevated content of this metalloid in the soil imported for the Kovykta gas condensate field development. Thus, the integration of geoinformation system technologies and geochemical survey results is an effective tool for the comprehensive geoecological assessment of the territory in the technogenic zone and serves as a basis for the development of effective, modern, object-oriented monitoring in the gas condensate field zone.

Keywords: gas condensate field, industrial site, gas well cluster, soil, geochemical parameters, heavy metals, geoinformation system

For citation: Pyzhianov D.I., Sarapulova G.I. Spatiotemporal distribution of elements in technogenic soils of Kovykta gas condensate field. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):72-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-6>. EDN: UKAGXU.

Введение

Геоэкологическое состояние территории газоконденсатных месторождений находится под влиянием возрастающей активной добычи и связано с проблемой нарушения таежных ландшафтов, рисками загрязнения почв продуктами бурения, подготовкой и транспортировкой газа [1, 2]. При этом происходит механическое разрушение почвы, отрицательное физико-химическое воздействие с фрагментарным или полным уничтожением гумуса и уплотнение верхнего слоя. Химическое воздействие на почвенный покров наблюдается как в результате атмосферных выпадений от промышленных узлов, так и вследствие утечки и потерь технологических жидкостей работающих установок. Это случается также по причине нарушений технологического регламента работы оборудования и аварий. На территориях добычи газа возникает угроза устойчивой и подчас необратимой трансформации природных экосистем, формируется горнопромышленная природно-техногенная система с доминированием техногенной составляющей. Причем границы такого воздействия значительно превышают территорию района непосредственного освоения месторождения [3].

Пространственно-временное распределение элементов загрязнителей, в том числе тяжелых металлов в почвах, характеризуется, как правило, высокой неоднородностью, концентрируясь у источников загрязнения и накапливаясь со временем из-за отсутствия биодеградации. Максимальные концентрации характерны для верхнего гумусового горизонта, загрязнение носит кумулятивный характер, а при длительном техногенном воздействии концентрации тяжелых металлов в почве растут.

В связи с этим прогнозирование масштабов негативного влияния районов газодобычи на почвы является актуальной и необходимой перспективной задачей для выявления наиболее

уязвимых природных компонентов территории под влиянием усиливающегося горнопромышленного техногенеза [4, 5].

Несмотря на ряд работ по изучению геоэкологического состояния территорий в зоне добычи газа, проблема формирования объектно-ориентированного эколого-геохимического мониторинга на территории месторождений, а также перспективы техногенного воздействия на почвы остаются актуальными [6–8].

Необходимо учитывать, что при высоком уровне загрязнения, превышающем емкость почвы к связыванию токсикантов, может произойти накопление загрязняющих веществ в почвенном профиле и их последующая миграция [9–12]. Мировые исследования и мониторинг состояния почв фиксируют опасный мировой тренд повышения концентраций тяжелых металлов, что наиболее остро наблюдается в зоне освоения недр и добычи полезных ископаемых. В результате на этих территориях формируются опасные эндогенные процессы, возникают локальные геохимические аномалии с высоким содержанием токсикантов, происходит формирование глобальной техногенно-измененной геохимической структуры литосферы [13], поэтому разработка новых подходов геоэкологической оценки динамично изменяющихся природных систем в условиях усиливающегося техногенеза является актуальной проблемой [14].

В данной работе основной акцент сделан на исследование пространственно-временной динамики геоэкологического состояния почвенного покрова, который является естественным депо при поступлении всех загрязняющих веществ в процессе работы многих промучлов при добыче газа. Наиболее эффективным и наглядным приемом является использование геоинформационных систем технологий (ГИС-технологий), позволяющим с высокой степенью информативности оценить



изменение состояния территории, в том числе почв, прогнозировать развитие ситуации в условиях техногенеза.

В рамках проводимых нами систематических исследований в зоне техногенеза по теме «Теория и методы геоэкологической оценки экосистем, инженерная защита и прогнозирование состояния техногенно-измененной природной среды» сформулированы следующие цели и задачи настоящей работы.

Цель исследования – с использованием геохимических параметров почв и ГИС-технологий выявить пространственно-временную динамику распределения тяжелых металлов – кобальта, марганца, меди, никеля, свинца, кадмия, цинка (входящих в основной список приоритетных загрязнителей), а также мышьяка – в техногенно-трансформированных почвах на территории газоконденсатного месторождения.

Задачи исследования:

1) выявить потенциальные источники техногенного поступления загрязнителей почв на промплощадке месторождения;

2) получить количественные параметры геохимического состояния техногенных почв в динамике по годам в период 2023–2026 гг. и ранее (для сравнения) с учетом приоритетного списка загрязнителей;

3) получить ГИС-распределение (карты-ореолы) контролируемых элементов в почвах

на территории месторождения, выявить геохимические аномалии и ассоциации, а также направления миграции загрязнителей.

Материалы и методы исследования

Объект исследования. В качестве объекта исследования были выбраны техногенные почвы на территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения, расположенного на севере Иркутской области. На рис. 1 представлен район расположения газоконденсатного месторождения и промышленные установки на промплощадке, где в течение трех лет проводился отбор почв для исследований.

Предмет исследования. Предметом исследования являлась почва в зоне влияния промышленных объектов (узлов) на промплощадке Ковыктинского газоконденсатного месторождения и ее геохимические параметры, служащие индикаторами экологического состояния.

Методы исследования. В работе для решения поставленных задач применялись следующие методы: системный подход, сравнительный и геоэкологический анализ, математическое и ГИС-моделирование. Пробоподготовка проводилась в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017¹. Элементный химический состав почв валовых содержаний определялся стандартными методами геохимии: атомно-абсорбционной спектроскопией (на

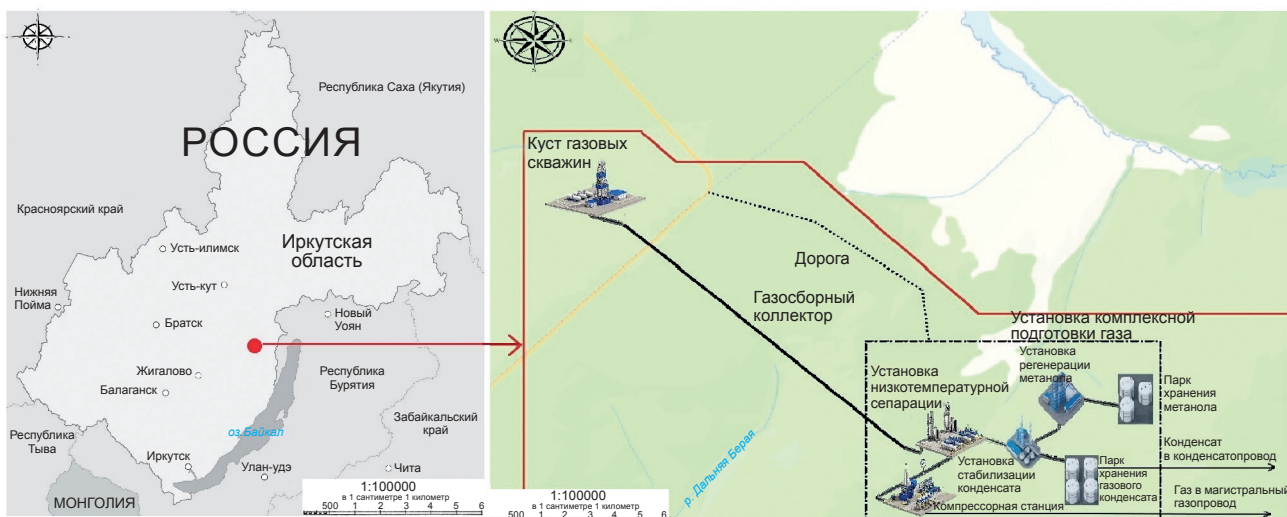


Рис. 1. Расположение Ковыктинского газоконденсатного месторождения и промышленные установки на промплощадке

Fig. 1. Location of the Kovykta gas condensate field and industrial installations at the industrial site

¹ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.



сертифицированном оборудовании и рентгенофлуоресцентным анализом с использованием портативного прибора SciAps серии X200-30453.

Значения рН почв получены потенциометрически по ГОСТ 26212-91². Содержание органического углерода – фотометрически по ГОСТ 26213-2021 (п. 6.1)³, содержание общего азота – фотометрическим методом по ГОСТ Р 58596-2019 (п. 7.2)⁴. Статистическая обработка данных выполнена в Statistica 10, картосхемы построены в Surfer 23.1.162 с использованием ГИС-приемов⁵ [15–17].

Результаты исследования и их обсуждение

Для реализации хозяйственной деятельности за период эксплуатации Ковыктинского месторождения задействовано более 7,5 тыс. км² земель, что при интенсивной добыче газа и негативном воздействии на почвы неизбежно приводит к деградации почв. Однако район добычи расширяется. Суглинистые почвы на территории месторождения сформировались как техноземы, которые распространены по всей промплощадке. Почвогрунты для обустройства и планировки завозились с близлежащих карьеров и заимок в пределах Иркутской области, в частности, из районов Жигаловского и Казачинско-Ленского районов. Аргиллиты и глинистые породы – из местных карьеров Ярактинского месторождения и близлежащих мест.

В соответствии с задачами проведен критический анализ промузлов на площадке с позиции потенциального поступления загрязняющих веществ в почвенный слой.

Газовые скважины. Газовые скважины являются критически важным начальным технологическим объектом, определяющим работоспособность и основную эффективность месторождения. В почву при работе скважины попадают буровой шлам, нефтепродукты и конденсат, метанол (как ингибитор гидратообразования), рапа, богатая тяжелыми металлами и солями. Буровые жидкости, которые применя-

ются при бурении, могут также содержать реагенты, такие как полимеры и реологические модификаторы [18, 19].

Газосборный коллектор. Газосборный коллектор – это трубопроводная система сбора газа и конденсата. Загрязнителями от протечек могут быть газовый конденсат и углеводороды, метанол, рапа, содержащая в большом количестве тяжелые металлы и соли, просачивающиеся в грунт при коррозии или повреждениях металла [20].

Установка низкотемпературной сепарации. Данная технология заключается в отделении жидкости от газа, отделении конденсата и водометанольного раствора путем его охлаждения до -40 °С с помощью турбодетандера, теплообменника, эжектора, дросселя. Утечки приводят к сбросу в почву легких углеводородов, метана, хладагентов, метанола.

Компрессорная станция. На станции происходит сжатие газа винтовыми, поршневыми или центробежными компрессорами для поддержания давления в сети и транспортировки газа по магистральному газопроводу. Загрязняющие почву вещества в результате протечки: смазки, масла, газы, конденсаты.

Установка стабилизации конденсата. На установке происходит процесс нагрева и ректификации нестабильного конденсата для удаления из него легких фракций углеводородов. Отходы от утечек: сырой конденсат, пропан-бутановая фракция и сточные воды, проникающие в грунт.

Установка регенерации метанола. На установке происходит восстановление метанола из богатой смеси посредством нагрева и ректификации для повторного использования с целью предотвращения гидратообразования. Протечки содержат метанол и примеси воды с солями.

Парк хранения метанола. Парк хранения метанола представляет собой резервуарный парк с цилиндрическими емкостями на фундаментах. Утечки вызывают просачивание метанола в почву, приводя к токсичному загрязнению территории.

² ГОСТ 26212-91. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. М.: Изд-во стандартов, 1992. 7 с.

³ ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 11 с.

⁴ ГОСТ Р 58596-2019 (п. 7.2). Почвы. Методы определения общего азота. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

⁵ Getting to know ArcView GIS: the geographic information system (GIS) for everyone by Environmental Systems Research Institute (Redlands, Calif.). Режим доступа: https://archive.org/details/isbn_9781879102460/page/n9/mode/2up (дата обращения: 15.11.2025).



Парк хранения газового конденсата. Парк хранения газового конденсата – это резервуарный комплекс для легких углеводородов. Основные отходы, поступающие в почву при коррозии или переливах: сырой конденсат, бензиновые фракции.

В почвах исследуемой территории месторождения было выявлено превышение содержания валовых форм марганца – до 1700 мг/кг (предельно допустимые концентрации (ПДК) – 1500 мг/кг), мышьяка – до 11–14,4 мг/кг (ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) – 2 мг/кг), никеля – до 85 мг/кг (ОДК – 40 мг/кг). ОДК мышьяка в почве регулируются ГН 2.1.7.020-94⁶ и зависят от физико-химических свойств почвы, включая гранулометрический состав, в т. ч. для суглинков – ОДК мышьяка – 10 мг/кг. Нормирование содержания мышьяка в настоящее время не учитывает формы его нахождения в почвах. Однако при решении вопроса о степени загрязнения почв мышьяком имеет значение то, в какой форме мышьяк накапливается в данном объекте. Токсичность мышьяка зависит от степени окисленности: трехвалентный в 2–3 раза токсичнее, чем пятивалентный, который менее подвижен, прочнее адсорбируется. Определение химических форм мышьяка в почвенных водах показало, что в аэробных почвах он содержится в основном в форме $As_3O_4^{3-}$ -анионов, в анаэробных – AsO_4^{3-} . Оксиды мышьяка водорастворимые, а галогенарсенаты, наоборот, гидрофобны. Однако, естественно, эти нюансы не учитываются при оценке уровня загрязнения почвы и не контролируются в рамках экологического контроля.

Значение ключевого параметра состояния почв рН-водной вытяжки составляет от 4,2 до 5,5, что характеризует закисление поверхностного почвенного слоя в зоне промплощадки. Это может приводить к увеличению подвижности тяжелых металлов, поступающих при бурении из недр в виде попутных элементов, и к их иммобилизации в почве.

За период с 2019 по 2025 г. проведен сравнительный временной анализ содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвах, обозначенных на картах ГИС-пунктов регулярного пробоотбора (геоэкологический мониторинг –

весна–осень) по всем указанным технологическим участкам (узлам).

Проведена предварительная фоновая оценка содержания химических элементов вне промплощадки на расстоянии 10 км от нее. Кроме того, был рассчитан геохимический фон для почв методом кларков (по А.Е. Ферсману). Значение валового содержания элементов в почве наиболее часто используется в геохимии и техногеохимии. По величине валового содержания элементов оценивают контрастность и емкость геохимических барьеров, определяют формирование аномальных геохимических модулей. Использование кларка позволяет оценивать мощность природной или техногенной аномалии как положительной (при превышении кларка), так и отрицательной (при уровне ниже кларкового).

В нашем случае, по сравнению с кларками почв мира, в изученных почвах на уровне или выше накопления находятся следующие элементы:

– мышьяк, марганец, никель (коэффициент накопления $K_k \geq 1,5$);

– в ассоциацию околосларковых входят медь, цинк (коэффициент накопления $K_k - 0,8-1,5$);

– с дефицитом содержания фиксируются элементы свинца, кобальта (коэффициент накопления $K_k \leq 0,7$). При этом использовались медианные значения для сравнительной геохимической характеристики относительно мировых кларков почв мира по А.П. Виноградову – As – 5 мг/кг, Ni – 40 мг/кг, Mn – 850 мг/кг.

Выявлена временная динамика повышения содержания для трех элементов марганца, мышьяка, никеля с начала функционирования месторождения по годам. Получены гистограммы (усы), позволяющие наглядно оценить зависимости между интенсивностью освоения территории в зоне добычи газа и уровнем негативного воздействия в виде поступления этих элементов в почву от промышленных узлов (рис. 2).

Для выяснения различного характера наблюдаемого распределения контролируемых элементов в почвах проведен анализ темпов и масштабов освоения и обустройства промплощадки по указанным годам.

⁶ Гигиенические нормативы 2.1.7.020-94. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг). Дополнение № 1 к перечню ПДК и ОДК № 6229-91.

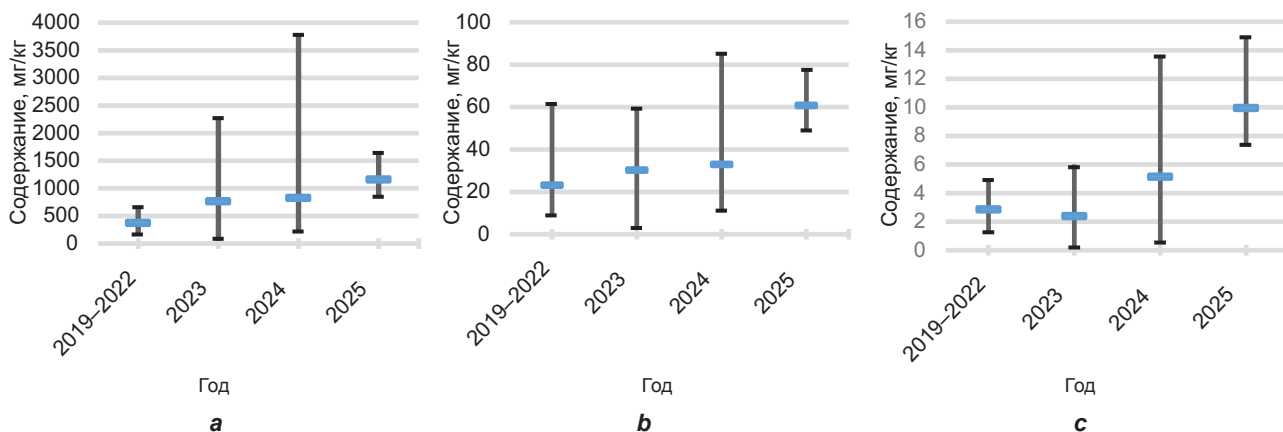


Рис. 2. Динамика содержаний марганца (а), никеля (b), мышьяка (с) в почвах промплощадки относительно средних значений
Fig. 2. Dynamics of manganese (a), nickel (b), arsenic (c) contents in the soils of the industrial site relative to average values

Все промышленные объекты (установка комплексной подготовки газа, кусты скважины, склады, терминалы и пр.) занимают около 7 км².

2019–2022 гг. характеризуются началом работ, это этап опытно-промышленной эксплуатации объекта, установки и подготовки по основным промышленным объектам. Эксплуатация газовых скважин не началась.

2023 г. – интенсивные сварочные работы и установка всего оборудования.

2024 г. – период максимальной мощности добычи и наращивания производственных мощностей.

2025 г. – этап стабилизации технологических процессов и выход на проектируемые параметры.

Показано, что почвы характеризуются кислой и слабокислой средой, низким содержанием органического углерода и низким обогащением азота (рН = 4–5 ед.), органического углерода ($C_{орг} = 10\%$), общего азота ($N_{общ} = 0,6\%$). Закисление почвы и отсутствие необходимого количества органики и азота в почве может обуславливать подвижность некоторых тяжелых металлов и мышьяка, что также способствует миграции этих элементов.

Постоянные сварочные работы, особенно на трубопроводах, которые проложены по всей территории промплощадки, обуславливают активное поступление марганца в почвы. При этом также выявлено большое содержание общего железа в техногенных почвах. Это обусловило аккумуляцию марганца в почвенном слое на геохимическом барьере в виде окислов железа и его конкре-

ций. Причем, независимо от концентрации поступающего в почву марганца, геохимический барьер в виде окислов железа в почве эффективно выполняет свою аккумулятивную роль.

Аналогичная стабильная аккумуляционная зависимость наблюдается в случае распределения никеля в почвах. Однако в случае распределения мышьяка в техногенной почве характер процесса, закрепление мышьяка железом, существенно меняется (рис. 3).

Обнаружена отрицательная корреляция (заметная, умеренная, статистически значимая связь) между содержанием железа и мышьяка с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,5636$. Это означает, что в отличие от марганца и никеля мышьяк слабо сорбируется на твердой железистой фазе. Причиной наблюдаемого эффекта может быть высокая чувствительность этого металлоида к рН-среде: он максимально закрепляется с высокой степенью окисления V в щелочной среде по сравнению с кислой. А поскольку наблюдаемая рН почвенной среды промплощадки кислая (рН = 4–5), то мышьяк не иммобилизуется на гидроксидах железа. Очевидно также, что при этом валовые формы переходят в более подвижные, поэтому наблюдается уменьшение эффективности железистого барьера к закреплению валового мышьяка.

Для визуализации геохимических данных получены ГИС-распределения доминирующих элементов-загрязнителей в почвенном слое за весь период наблюдений. ГИС на основе пространственной привязки геохимиче-

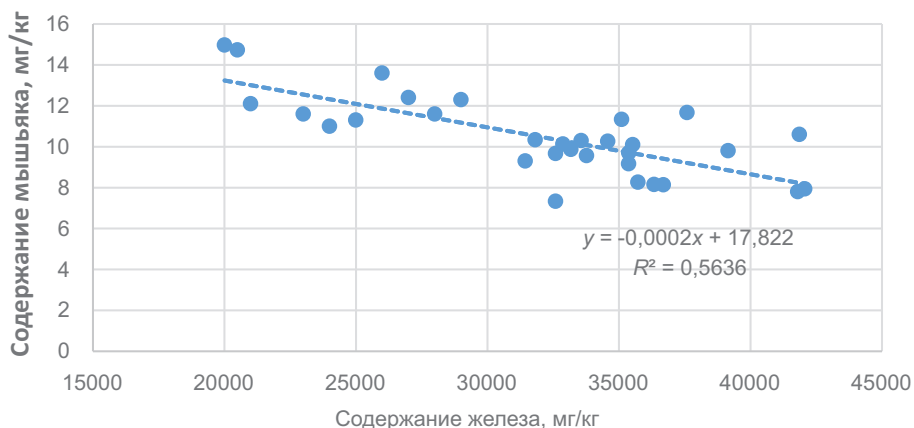


Рис. 3. Зависимость содержания мышьяка от содержания железа
Fig. 3. Dependence of arsenic content on iron content

ских данных к территории представляет собой многофункциональный инструмент комплексной оценки ее состояния и прогнозирования устойчивости территорий к негативному эко-

логическому воздействию. На примере 2025 г. приведены визуализированные результаты геохимического анализа почв и направление миграции элементов (рис. 4–6).

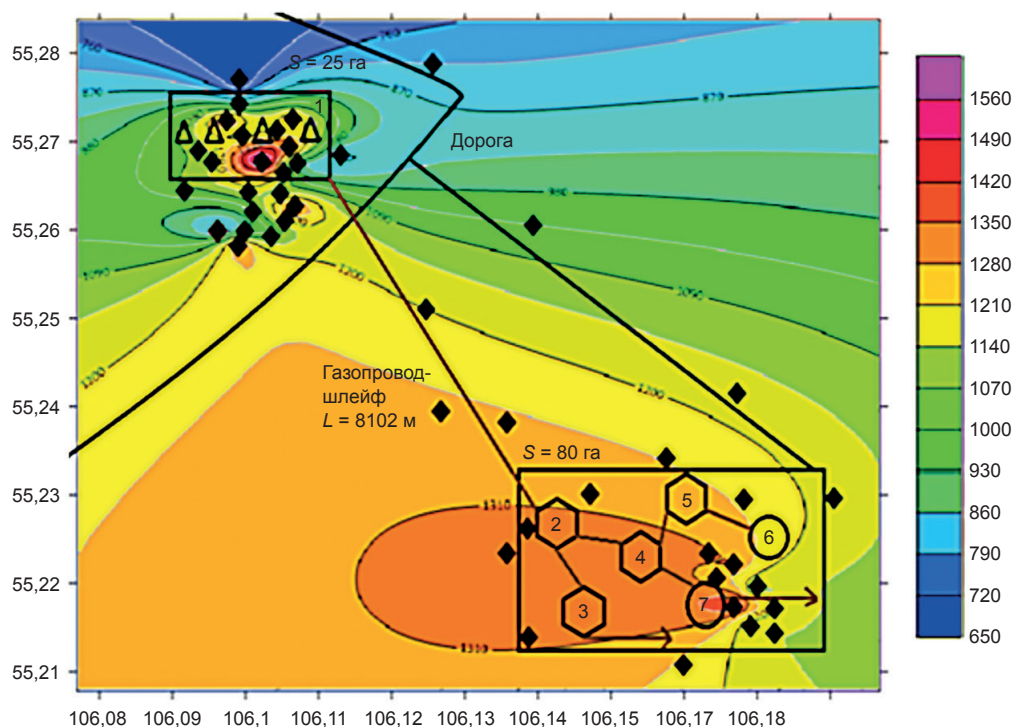


Рис. 4. Геоинформационное системное распределение марганца в почвах на территории промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения, мг/кг:

- 1 – куст газовых скважин; 2 – установка низкотемпературной сепарации;
3 – центральная дожимная компрессорная скважина;
4 – установка стабилизации конденсата; 5 – установка регенерации метанола;
6 – парк хранения метанола; 7 – парк хранения стабильного конденсата

Fig. 4. Geoinformation system distribution of manganese in soils at the Kovykta gas condensate field site, mg/kg:

- 1 – gas well cluster; 2 – low-temperature separation unit;
3 – central booster compressor well;
4 – condensate stabilization unit; 5 – methanol recovery unit;
6 – methanol storage facility; 7 – stable condensate storage facility

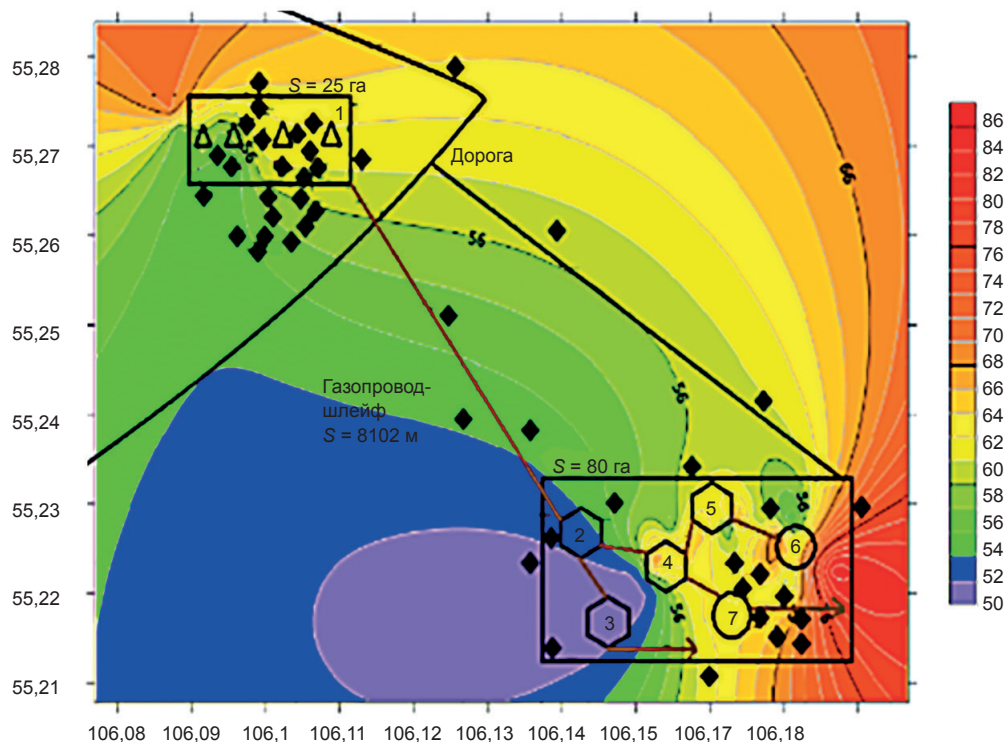


Рис. 5. Геоинформационное системное распределение никеля в почвах на территории промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения, мг/кг:

Описание условных обозначений см. на рис. 4

Fig. 5. Geoinformation system distribution of nickel in soils at the Kovykta gas condensate field site, mg/kg:

For a description of the symbols, see Fig. 4

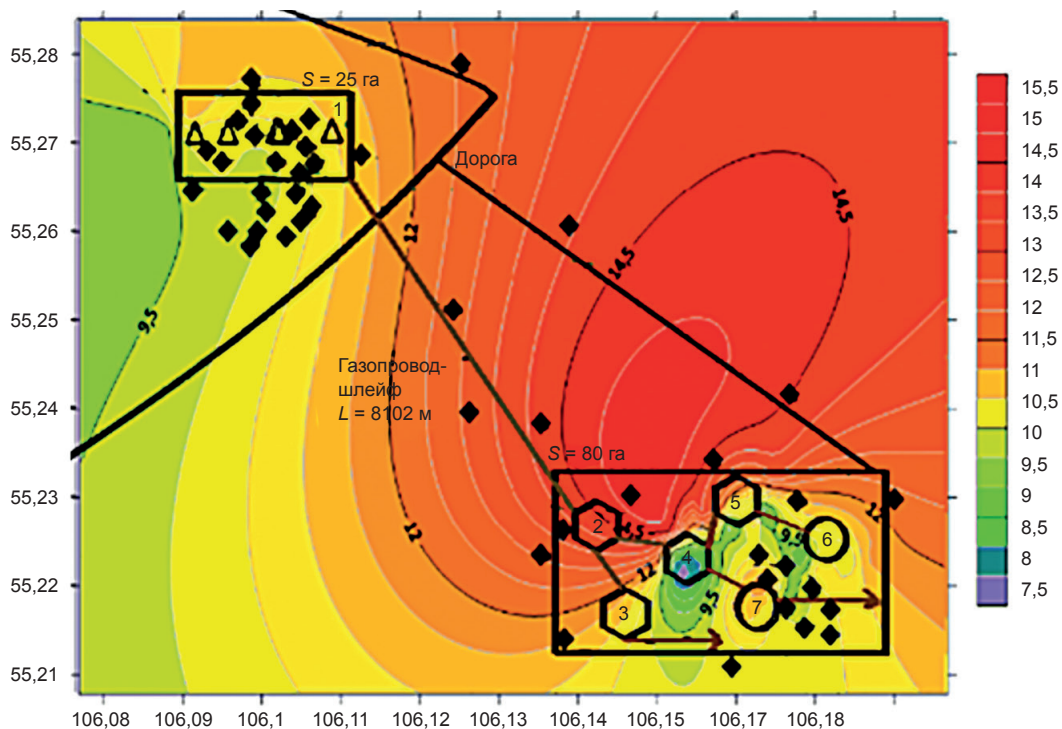


Рис. 6. Геоинформационное системное распределение мышьяка в почвах на территории промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения, мг/кг:

Описание условных обозначений см. на рис. 4

Fig. 6. Geoinformation system distribution of arsenic in soils at the Kovykta gas condensate field site, mg/kg:

For a description of the symbols, see Fig. 4



Проведенные временной и пространственный ГИС-анализы подтвердили результаты технологического анализа промузлов на площадке с позиции загрязнения почв: в одном случае это природное поступление элемента, в другом – техногенное происхождение повышенных концентраций тяжелых металлов в почвенном слое. Так, марганец преимущественно аккумулируется в почвах в зоне трубопроводов и там, где регулярно происходит сварка: сваривают по 700 м труб в сутки, до 5000 м в неделю. При сварке образуется сварочный аэрозоль в зоне дугового разряда с оксидами марганца и никеля из покрытий электродов. Наличие фторидов натрия в электродах также влияет на образование большого количества марганца, оседающего на почвы.

ГИС-распределение никеля также может быть связано с производством постоянного металлоремонта, сварки труб и истиранием деталей машин от большого потока транспорта. В пике работ ежедневно на месторождении проходит 100–300 единиц транспорта, включая 50–100 грузовиков и 20–50 единиц спецтехники, что эквивалентно 3000–9000 в месяц.

Выявленное на основе ГИС площадное превышение содержания мышьяка в почвах связано с привозным грунтом с Ярактинского месторождения для планировки и обустройства площадки добычи газа. Это согласуется с данными о превышении ОДК мышьяка в почвах данного региона, что обусловлено природным геологогеохимическим фоном Иркутской области в Прибайкалье. Кроме того, обустройство буровых площадок и прокладка геофизических профилей сейсморазведки постоянно нарушают почвенный покров, поднимая мышьяк из нижних горизонтов на поверхность. Превышение содержания мышьяка также связано с подстилающими породами района добычи. Привозной грунт для отсыпки и планировки промышленных площадок Ковыктинского газоконденсатного месторождения богат мышьяком.

Также следует подчеркнуть, что на аккумуляцию указанных элементов в почве может оказывать влияние сорбционная активность подвижных ионов (катионов) кальция, магния, калия, натрия в почвенном поглощающем комплексе, которые поступают на территорию промплощадки в виде рапы (высоконцентри-

рованный раствор солей) от бурения скважин. Это может дополнительно приводить к иммобилизации некоторых элементов на химическом барьере вследствие образования соединений с низкой скоростью миграции, таких как гидроксокомплексы с участием тяжелых металлов.

Заключение

Выявлен характер пространственно-временного распределения тяжелых металлов и мышьяка на территории газоконденсатного месторождения за период 2019–2025 гг. Временная динамика повышения содержаний элементов марганца, мышьяка, никеля с начала функционирования месторождения по годам позволяет наглядно оценить зависимость между интенсивностью освоения территории в зоне добычи газа и уровнем негативного воздействия в виде поступления этих элементов в почву. Геохимические показатели отражают их высокую функциональность в условиях негативного воздействия при добыче газа и реально оценивают геоэкологическую обстановку на месторождении. Получены коэффициенты накопления элементов относительно мировых кларков по А.П. Виноградову: обнаружен повышенный коэффициент накопления мышьяка, марганца, никеля ($K_k \geq 1,5$). Наглядные ГИС-распределения контролируемых элементов – доминирующих загрязнителей (марганца, никеля, мышьяка) – выявили ореолы их распространения и направления миграции. Показано, что пространственное распределение элементов марганца, никеля связано с технологическими процессами, регулярными производственными работами и сваркой.

Случаи превышения содержаний мышьяка над нормативом могут быть обусловлены наложением геолого-геохимической особенности Прибайкальской природной территории с повышенным содержанием этого металлоида в составе привозного грунта для планировки территории газоконденсатного месторождения.

Таким образом, интеграция ГИС-технологий с результатами геохимических исследований является эффективным инструментом комплексной оценки территории в зоне техногенеза и служит основой для создания эффективного современного объектно-ориентированного мониторинга в зоне газоконденсатного месторождения.



Список источников

1. Шавина Е.В. Тенденции развития мировой газовой отрасли в современных условиях // Геоэкономика энергетики. 2020. Т. 12. № 4. С. 40–58. https://doi.org/10.48137/2687-0703_2020_12_4_40. EDN: IYKZDR.
2. Шафигуллин Р.И., Сагатов Р.Ф., Аслямов А.И., Павлов Э.И., Абакумов А.В., Мухаметзянов Р.Ф. [и др.]. На страже экологической безопасности // Бурение и нефть. 2023. № 7–8. С. 34–36. EDN: ZCIOZU.
3. Аленичев В.М. Критерии системной оценки изменений природно-технологических систем при недропользовании // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 5–1. С. 207–216. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_207. EDN: ADWUFY.
4. Pashkevich M.A., Danilov A.S. Ecological security and sustainability // *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 260. P. 153–154. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16233> (дата обращения: 28.01.2026).
5. Исмагилова В.С., Чекушина Т.В. Транспортировка трубопроводного и сжиженного природного газа: сравнительный анализ достоинств и недостатков // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 61–71. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-61-71>. EDN: IROGBA.
6. Белозерцева И.А. Интегральная оценка экологического состояния почвенного покрова при добыче газа в Среднем Приангарье // Почвоведение. 2020. № 2. С. 244–258. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20020021>. EDN: ABRVXF.
7. Окмянская В.М. Актуальные вопросы локального экологического мониторинга промышленной площадки на примере нефтегазодобывающего региона // *International Agricultural Journal*. 2022. Т. 65. № 6. С. 1084–1102. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_27. EDN: VFZKWP.
8. Galchenko Yu.P., Eremenko V.A. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in lithosphere // *Eurasian Mining*. 2019. № 2. P. 3–8. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.01>. EDN: UIEWSK.
9. Кожевин П.А. Показатели почвенного «здоровья» в оценке почв (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 2. С. 16–25. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25>. EDN: FQQDNU.
10. Копчик С.В., Копчик Г.Н. Оценка современных рисков избыточного накопления тяжелых металлов в почвах на основе концепции критических нагрузок (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 615–630. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>. EDN: SNJYDE.
11. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021. Vol. 54–1. P. 8–12. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12>. EDN: SMJVYI.
12. Гайрабеков У.Т. Геоэкологические аспекты освоения нефтегазовых месторождений в горных и предгорных районах (на примере Чеченской Республики) // Устойчивое развитие горных территорий. 2016. Т. 8. № 2. С. 127–134. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-2-127-134>. EDN: WMOVZP.
13. Гулиева Г.А. Загрязнение окружающей среды в результате геологоразведочных работ на Физличайском колчеданно-полиметаллическом месторождении // Горный журнал. 2024. № 7. С. 75–79. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.07.12>. EDN: MSUBYX.
14. Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 388–392. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.388>. EDN: CMPBUO.
15. Сидиков Ф.У. Геоинформационная система: перспективы, рациональное использование программного обеспечения ArcGIS // Молодой ученый. 2012. № 4 (39). С. 86. EDN: NKVLYA.
16. Джалилова Г.Т. Разработка и внедрение информационно-аналитических систем в мониторинге деградационных процессов горных почв // Молодой ученый. 2018. № 19. С. 18–20. EDN: OSUZHP.
17. Glazovskaya M.A. Problems and methods of assessment of the ecogeochemical resilience of soils and the soil cover towards technogenic impacts // *Eurasian Soil Science*. 1999. Т. 32. № 1. С. 99–108. EDN: LFPJXB.
18. Gizatullin R.R., Dvoynikov M.B., Romanova N.A., Nikitin V.V. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 5. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/en16052387>.
19. Makwashi N., Zhao D., Abdulkadir M., Ahmed T., Muhammad I. Study on waxy crudes characterization and chemical inhibitor assessment // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 204. P. 108734. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108734>. EDN: YXSCCK.
20. Козлов А.А., Александров И.С., Шестаков Р.А. Методика обнаружения координаты утечки газа как способ повышения безопасности и экологичности эксплуатации магистрального газопровода // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 8. С. 32–37. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-8-32-37>. EDN: LSXHZI.

References

1. Shavina E.V. World gas industry development trends in modern conditions. *Geoeconomics of Energetics*. 2020;12(4):40-58. (In Russ.). https://doi.org/10.48137/2687-0703_2020_12_4_40. EDN: IYKZDR.
2. Shafigullin R.I., Sagatov R.F., Aslyamov A.I., Pavlov E.I., Abakumov A.V., Mukhametzhanov R.F., et al. On guard for environmental safety. *Burenie i neft'*. 2023;7-8:34-36. (In Russ.). EDN: ZCIOZU.
3. Alenichev V.M. Criteria for system assessment of changes in natural and technological systems in subsurface use. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021;5-1:207-216. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_207. EDN: ADWUFY.
4. Pashkevich M.A., Danilov A.S. Ecological security and sustainability. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:153-154. Available from: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16233> [Accessed 28th January 2026].



5. Ismagilova V.S., Chekushina T.V. Transportation of pipeline and liquefied natural gas: comparative analysis of pros and cons. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2023;46(1):61-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-61-71>. EDN: IROGBA.
6. Belozertseva I.A. Experience of integrated assessment of soil cover state at production of underground energy resource in Middle Angara catchment. *Eurasian Soil Science*. 2020;2:244-258. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032180X20020021>. EDN: ABRVXF.
7. Okmyanskaya V.M. Topical issues of local environmental monitoring of an industrial site on the example of an oil and gas producing region. *International Agricultural Journal*. 2022;65(6):1084-1102. (In Russ.). https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_27. EDN: VFZKWP.
8. Galchenko Yu.P., Eremenko V.A. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in the lithosphere. *Eurasian Mining*. 2019;2:3-8. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.01>. EDN: UIEWSK.
9. Kozhevin P.A. Soil "health" indicators in soil assessment (review). *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*. 2023;2:16-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25>. EDN: FQQDNU.
10. Koptsik S.V., Koptsik G.N. Assessment of current risks of excessive heavy metal accumulation in soils based on the critical loads concept (review). *Eurasian Soil Science*. 2022;5:615-630. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>. EDN: SNJYDE.
11. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021;54-1:8-12. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12>. EDN: SMJVYI.
12. Gayrabekov U.T. Geoecological aspects of oil and gas development in the mountain and foothill areas (using the example of the Chechen Republic). *Sustainable development of mountain territories*. 2016;8(2):127-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-2-127-134>. EDN: WMOVZP.
13. Gulieva G.A. Environmental pollution as a result of geological exploration at the Filizchay Pyrite-polymetallic deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2024;7:75-79. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.07.12>. EDN: MSUBYX.
14. Sarapulova G.I. Geochemical approach in assessing the technogenic impact on soils. *Journal of Mining Institute*. 2020;243:388-392. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.388>. EDN: CMPBUO.
15. Sidikov F.U. Geoinformation system: prospects and rational use of ArcGIS software. *Molodoi uchenyi*. 2012;4(39):86. (In Russ.). EDN: NKVLYA.
16. Dzhaililova G.T. Development and implementation of information-analytical systems in mountain soil degradation processes monitoring. *Molodoi uchenyi*. 2018;19(205):18-20. EDN: OSUZHP.
17. Glazovskaya M.A. Problems and methods of assessment of the ecogeochemical resilience of soils and the soil cover towards technogenic impacts. *Eurasian Soil Science*. 1999;32(1):99-108. EDN: LFPJXB.
18. Gizatullin R.R., Dvoynikov M.V., Romanova N.A., Nikitin V.V. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks. *Energies*. 2023;16(5):1-13. <https://doi.org/10.3390/en16052387>.
19. Makwashi N., Zhao D., Abdulkadir M., Ahmed T., Muhammad I., et al. Study on waxy crudes characterization and chemical inhibitor assessment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;204:108734. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108734>. EDN: YXSCCK.
20. Kozlov A.A., Aleksandrov I.S., Shestakov R.A. The method of detecting the coordinates of gas leak as a way to improve the safety and environmental friendliness of the operation of the main gas pipeline. *Ecology and industry of Russia*. 2024;28(8):32-37. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-8-32-37>. EDN: LSXHZI.

Информация об авторах / Information about the authors



Пыжьянов Даниил Игоревич,

аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
✉ dan555inx@gmail.com
<https://orcid.org/https://orcid.org/0009-0002-6059-7008>

Daniil I. Pyzhianov,

Postgraduate Student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
✉ dan555inx@gmail.com
<https://orcid.org/https://orcid.org/0009-0002-6059-7008>



Сарапулова Галина Ибрагимовна,

доктор химических наук, профессор,
профессор кафедры обогащения полезных ископаемых
и охраны окружающей среды,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
sara131@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5056-3181>

РИНЦ Author ID: 110513

Scopus Author ID: 7004366174

Researcher ID WoS: AAA-9993-2019

Galina I. Sarapulova,

Dr. Sci. (Chem.), Professor,
Professor of the Department of Mineral Processing
and Environmental Protection,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
sara131@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5056-3181>

РИНЦ Author ID: 110513

Scopus Author ID: 7004366174

Researcher ID WoS: AAA-9993-2019

Вклад авторов / Contribution of the authors

Д.И. Пыжьянов – проведение исследования, предоставление ресурсов, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

Г.И. Сарапулова – разработка концепции, курирование данных, формальный анализ, научное руководство, редактирование рукописи.

Daniil I. Pyzhianov – investigation, resources, validation, visualization, writing – original draft.

Galina I. Sarapulova – conceptualization, data curation, formal analysis, supervision, writing – editing.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 13.02.2026; одобрена после рецензирования 25.02.2026; принята к публикации 05.03.2026.

The article was submitted 13.02.2026; approved after reviewing 25.02.2026; accepted for publication 05.03.2026