



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ, РАЗВЕДКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ/GEOLOGY, PROSPECTING, EXPLORATION AND EXPLOITATION OF OIL AND GAS FIELDS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.23> EDN: QRZZDL**ГИС-ТЕХНОЛОГИИ В ОЦЕНКЕ МИГРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕХНОГЕННЫХ ПОЧВАХ ПРИ ГАЗОДОБЫЧЕ**

Научная статья

Пыжьянов Д.И.^{1,*}, Сарапулова Г.И.²^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (daniil.pyzhyanov[at]yandex.ru)

Аннотация

Исследованы геохимические особенности почв в районе газоконденсатного месторождения, характеризующиеся формированием ореолов загрязнения почв на основании ГИС-технологий. Выявлены доминирующие загрязнители почв — марганец Mn, никель Ni, мышьяк As и направления их миграции. В результате критического анализа применяемых технологий и установок показано, что превышения содержаний марганца Mn, никеля Ni в почвах связана с регулярными производственными работами, в частности, сваркой и поступлением тяжелого аэрозоля в почвы. В случае мышьяка As не выявлено промузлов и технологий, которые могли быть источником загрязнения почв этим элементом. Превышение ПДК по мышьяку в почвах обусловлено наследованием геолого- геохимической особенности Прибайкальской природной территории с повышенным содержанием этого металлоида, а также составом привозного грунта для планировки территории месторождения, обогащенного мышьяком.

Ключевые слова: газоконденсатное месторождение, промплощадка, куст газовых скважин, почва, геохимические параметры, тяжелые металлы, ГИС-технологии.

GIS TECHNOLOGIES IN THE ASSESSMENT OF ELEMENT MIGRATION IN ANTHROPOGENIC SOILS DURING GAS PRODUCTION

Research article

Pyzhyanov D.I.^{1,*}, Sarapulova G.I.²^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

* Corresponding author (daniil.pyzhyanov[at]yandex.ru)

Abstract

The geochemical characteristics of soils in the vicinity of a gas condensate field, characterised by the development of soil contamination plumes, have been studied using GIS technologies. The dominant soil contaminants—manganese (Mn), nickel (Ni) and arsenic (As)—and their migration pathways have been identified. A critical analysis of the technologies and installations used has shown that the elevated levels of manganese (Mn) and nickel (Ni) in the soils are linked to regular industrial operations, in particular welding and the deposition of heavy aerosols in the soil. In the case of arsenic (As), no industrial sources or technologies have been identified that could be the source of soil contamination with this element. Exceedances of the maximum permissible concentration (MPC) for arsenic in soils are due to the inherited geological and geochemical characteristics of the Baikal natural area, which has an elevated concentration of this metalloid, as well as the composition of the imported soil used for land planning the deposit site, which is enriched with arsenic.

Keywords: gas condensate field, industrial site, gas well cluster, soil, geochemical parameters, heavy metals, GIS technologies.

Введение

В результате долговременной эксплуатации газоконденсатных месторождений возникает горнопромышленная природно-техногенная система с доминированием техногенной составляющей. Причем границы такого воздействия значительно превышают территорию непосредственного района освоения [1], [2].

Несмотря на ряд работ по изучению территорий в зоне добычи газа, исследование геоэкологических аспектов и проведение локального экологического мониторинга в высокочувствительных северных регионах, а также перспективы техногенного воздействия на почвы остаются актуальными [3], [4], [5]. Важную роль в сохранении геоэкологического равновесия играют такие геохимические процессы, как аккумуляция элементов-загрязнителей и их миграция в почвенном слое [6]. Необходимо учитывать, что при высоком уровне загрязнения, превышающем емкость почвы к связыванию токсикантов, может произойти накопление загрязняющих веществ в почвенном профиле.

Поэтому разработка новых подходов геоэкологической оценки динамично изменяющихся природных систем о воздействии усиливающегося техногенеза является актуальной проблемой [7], [8]. В данной работе основной акцент сделан на исследование состояния почвенного покрова, который является естественным депо при поступлении всех загрязняющих веществ в процессе работы промузлов при добыче газа.

Так, оценка состояния техногенных почв в зоне Ковыктинского газоконденсатного месторождения после 12 лет активного функционирования не проводилась. Распространение элементов загрязнителей в зоне добычи также не



изучалось. Наиболее эффективным и наглядным приемом с этой целью является использование ГИС технологий, позволяющее с высокой степенью информативности оценить изменение состояния территории, в том числе почв, прогнозировать развитие ситуации в условиях техногенеза.

Цель исследования: с использованием ГИС технологий и геохимических параметров почв оценить геоэкологическое состояние территории и миграцию марганца Mn, никеля Ni, также мышьяка As- в техногенно-трансформированных почвах на Ковыктинском газоконденсатном месторождении.

Задачи исследования:

1. Выявить потенциальные источники техногенного поступления загрязнителей почв на промплощадке месторождения, в том числе тяжелых металлов и мышьяка.
2. Получить ГИС распределение (карты-ореолы) контролируемых элементов в почвах на территории месторождения, выявить геохимические ассоциации, а также направления миграции загрязнителей.

Методы и принципы исследования

Объект исследования – техногенные почвы на территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения, расположенного на севере Иркутской области (рисунок 1).

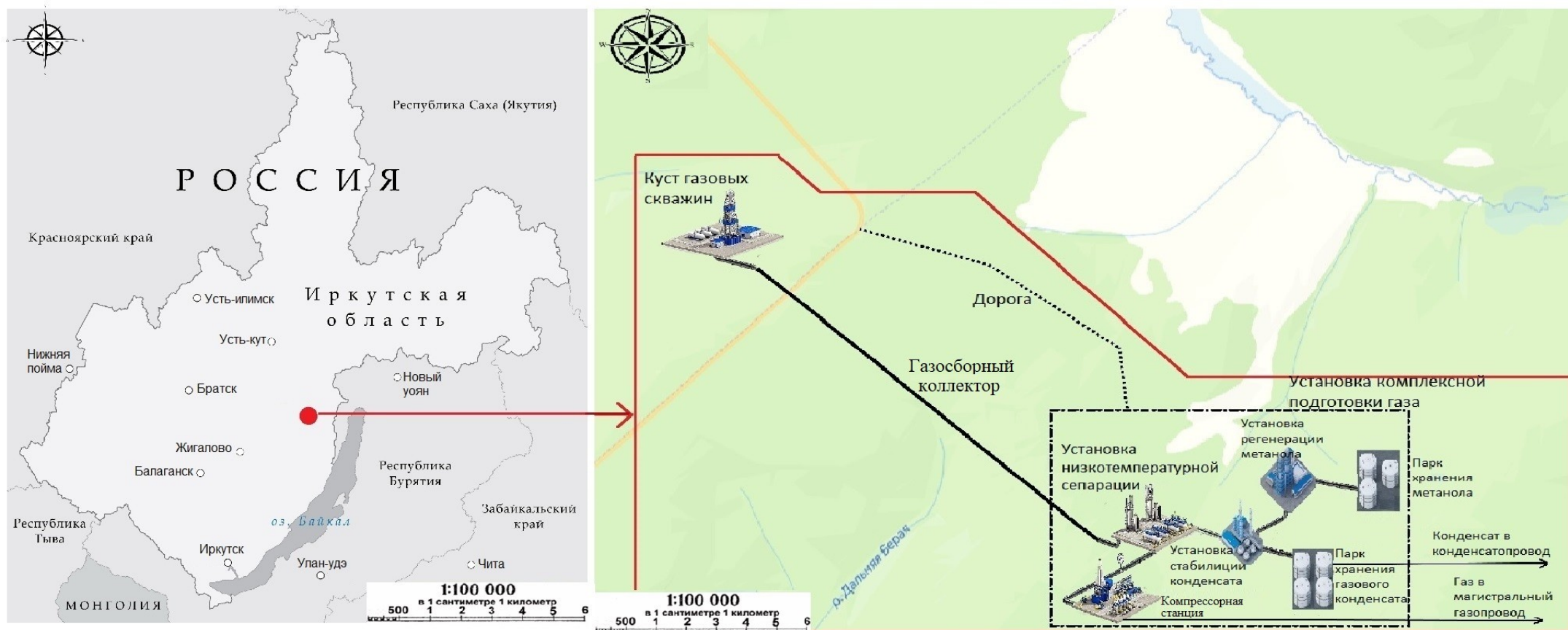


Рисунок 1 - Карта расположения Коввыктинского газоконденсатного месторождения и промышленные установки на промплощадке
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.23.1>

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 17.4.4.02-2017. Элементный химический состав почв валовых содержаний определялся стандартными методами геохимии: атомно-абсорбционной спектроскопией (ААС) на сертифицированном оборудовании и рентгенофлуоресцентным анализом (РФА) с использованием портативного прибора SciAps серии X200Gtjchemistry. Значения рН почв получены потенциометрически по ГОСТ 26212-91. Содержание органического углерода — фотометрически по ГОСТ 26213-2021 (п. 6.1). Содержание общего азота — фотометрическим методом по ГОСТ Р 58596-2019 (п. 7.2). Статистическая обработка данных выполнена в Statistica 10. Картосхемы построены в Surfer 23.1.162 [9].

Основные результаты

Пространственный ГИС анализ подтвердил результат технологического анализа промузлов на промплощадке: в одном случае это природное поступление элемента As, который распространен по всей территории месторождения. Mn преимущественно аккумулируется в почвах в зоне трубопроводов и там, где регулярно происходит сварка: свариваются по 700 метров труб в сутки, до 5 000 м в неделю. При сварке образуется сварочный аэрозоль в зоне дугового разряда с оксидами марганца и никеля из покрытий электродов. ГИС-распределение никеля Ni может быть также связано с производством постоянного метало-ремонта, 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.

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. Суглинистые почвы на территории сформировались как техноземы, которые распространены по всей промплощадке. Почвогрунты для обустройства Ковыктинского газоконденсатного месторождения для всей промплощадке завозились с близлежащих карьеров и заимок в пределах Иркутской области, в частности, из районов Жигаловского и Казачинско-Ленского районов, с карьеров Ярактинского месторождения.

В почвах исследуемой территории месторождения было выявлено превышение содержания валовых форм марганца Mn-до 1700 мг/кг (ПДК-1500 мг/кг), мышьяка As — до 11–14,4 мг/кг (ПДК — 2 мг/кг), никеля Ni до 85 мг/кг (ПДК — 40 мг/кг). Значение рН водной вытяжки составляет от 4,2 до 5,5, что характеризует существенное 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.

Проведен критический анализ промузлов на промплощадке с позиции потенциального поступления загрязняющих веществ в почвенный слой.

Газовые скважины. В почву при работе скважины в почву попадают буровой шлам, нефтепродукты, конденсат, метанол-как ингибитор гидратообразования, рапа богатая тяжелыми металлами и солями, ухудшающими структуру грунта и подавляющими микрофлору, буровые жидкости [10], [11].

Газосборный коллектор. Загрязнителями от протечек может быть газовый конденсат и углеводороды, метанол, рапа, богатая тяжелыми металлами и солями, просачивающимися в грунт при коррозии или повреждениях металла [12].

Установка низкотемпературной сепарации. Технология заключается в отделении жидкости от газа, отделения конденсата и водометанольного раствора путем его охлаждения до -40°C. Утечки приводят к поступлению в почву легких углеводородов, метана и хладагентов, метанола.

Компрессорная станция. Загрязняющие вещества в результате протечки — смазки, масла, газа и конденсата, загрязняющие почву.

Установка стабилизации конденсата. Отходы от утечек — сырой конденсат, пропан-бутановая фракция, проникающие в грунт.

Установка регенерации метанола. Протечки содержат метанол и примеси воды с солями.

Парк хранения метанола. Утечки вызывают просачивание метанола в почву, приводя к токсичному загрязнению территории.

Парк хранения газового конденсата. Основные отходы, поступающие в почву при коррозии или переливах — это сырой конденсат, бензиновые фракции.

За период 2019 г по 2025 год проведен сравнительный анализ аналитических определений тяжелых металлов в почвах по всем указанным технологическим участкам. По сравнению с кларками почв мира в изученных почвах на уровне и выше накопления находятся следующие элементы: мышьяк As, марганец Mn, никель Ni (коэффициент накопления $K_k \geq 1.5$). В ассоциацию околоскларковых входят медь Cu, цинк Zn ($K_k=0.8-1.5$), с дефицитом содержания $K_k \leq 0.7$ фиксируются элементы свинец Pb, кобальт Co. При этом использовались медианные значения для сравнительной геохимической характеристики относительно мировых кларков (Кларки почв мира по Виноградову — As-5 мг/кг, Ni-40/кг, Mn-850 мг/ кг.)

Выявлена динамика повышения содержаний для трех элементов Mn, As, Ni 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 от промышленных узлов (рисунок 2).

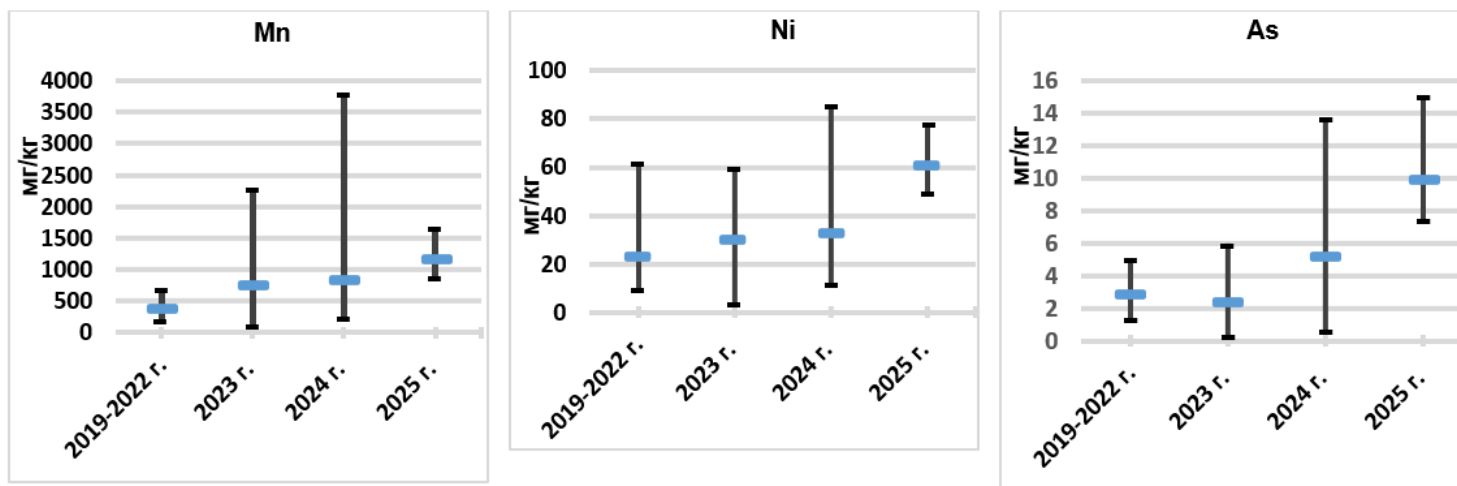


Рисунок 2 - Динамика содержаний Mn, Ni, As в почвах промплощадки относительно средних значений
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.23.2>

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

2023 год — интенсивные сварочные работы и установка оборудования.

С 2024 года — период максимальной мощности добычи и наращивания производственных мощностей.

С 2025 года этап стабилизации технологических процессов и выход на проектируемые параметры.

Показано, что почвы характеризуются не только кислой и слабокислой средой, но также низким содержанием органического углерода и низким обогащением азота: Сорг=10%, общий азот Нобщ=0,6%. Закисление почвы и отсутствие необходимого количества органики и азота в почве может обуславливать подвижность некоторых тяжелых металлов и мышьяка, что способствует миграции 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 до 45 000 мг/кг в техногенных почвах. Это обусловило аккумуляцию Mn в почвенном слое на геохимическом барьере в виде окислов железа и его конкреций. Причем показано, что практически независимо от концентрации Mn геохимический барьер в виде окислов железа в почве эффективно выполняет свою аккумулятивную роль (Рисунок 3).

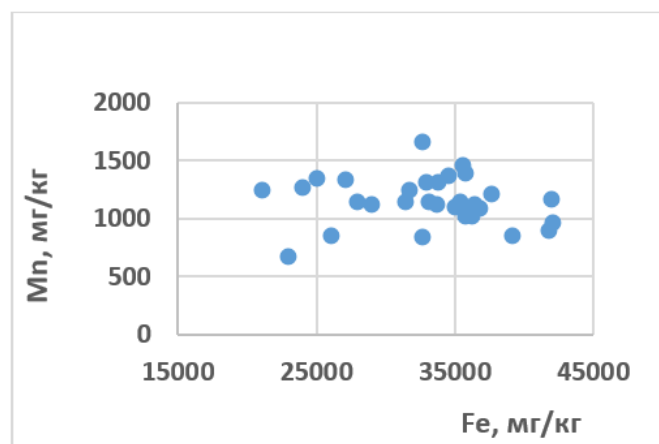


Рисунок 3 - Зависимость содержания Mn от Fe
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.23.3>

Аналогичная картина наблюдается в случае распределения Ni в почвах (рисунок 4).

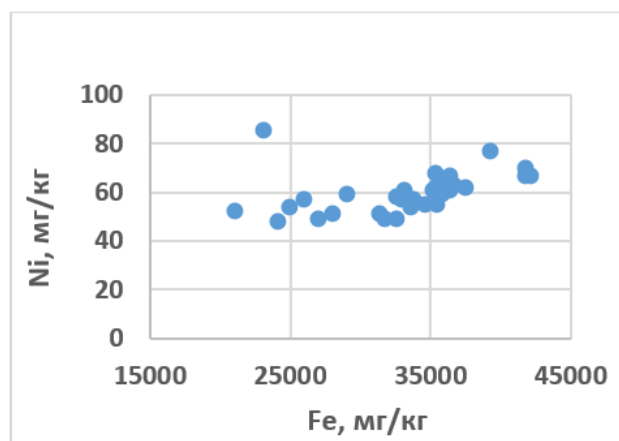


Рисунок 4 - Зависимость содержания Ni от Fe
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.23.4>

Однако в случае распределения мышьяка As в техногенной почве процесс закрепление мышьяка железом существенно меняется (рисунок 5).

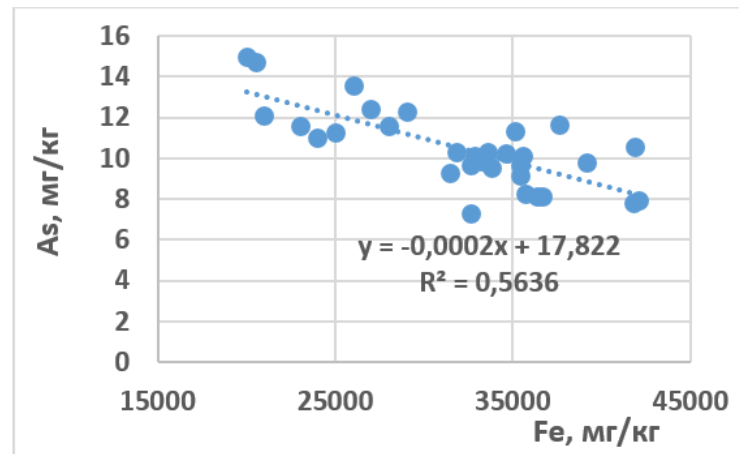


Рисунок 5 - Зависимость содержания As от Fe
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.23.5>

Обнаружена отрицательная корреляция (статистически значимая связь) между содержанием железа Fe и мышьяка As с коэффициентом детерминации $R^2=0.5636$ означает, что в отличие от марганца Mn и никеля Ni мышьяк слабо сорбируется на твердой железистой фазе даже с повышением концентрации. Причиной наблюдаемого эффекта может быть высокая чувствительность этого металлоида к pH среды: он максимально закрепляется с высокой степенью окисления (V) в щелочной среде по сравнению с кислой. А поскольку наблюдаемая pH почвенной среды промплощадки кислая pH=4-5, поэтому мышьяк не иммобилизуется на гидроксидах железа

Получены ГИС распределения доминирующих элементов-загрязнителей в почвенном слое на примере 2025 г. (рисунок 6).

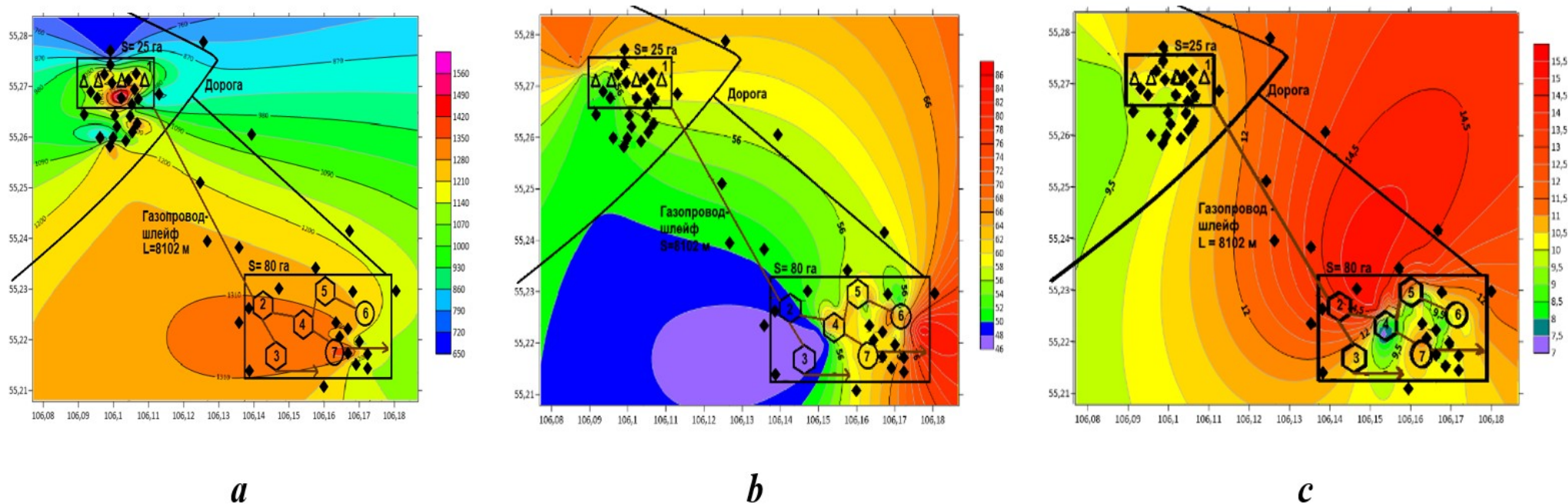


Рисунок 6 - ГИС распределение: а) Mn; б) Ni; с) As в почвах на территории промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.23.6>

Примечание: 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

**Заключение**

Получены ГИС распределения доминирующих элементов загрязнителей Mn, Ni, As, позволяющие выявить ореолы их распространения и направления миграции. Показано, что пространственное распределение техногенных элементов Mn, Ni преимущественно связано с технологическими процессами, регулярными производственными работами и сваркой.

В случае As превышение ПДК может быть обусловлено наследованием геолого-геохимической особенности Прибайкальской природной территории с повышенным содержанием этого металлоида в составе привозного грунта для планировки территории.

Интеграция ГИС технологий с результатами геохимических исследований является эффективным инструментом комплексной оценки территории в зоне техногенеза и служить основой для создания эффективного современного геоэкологического мониторинга.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Маракова И.А., Ухтинский государственный технический университет, Ухта Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.23.7>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Marakova I.A., Ukhta State Technical University, Ukhta Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.23.7>

Список литературы / References

1. Аленичев В.М. Критерии системной оценки изменений природно-технологических систем при недропользовании / В.М. Аленичев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5–1. — С. 207–216. — DOI: [10.25018/0236-1493-2021-51-0-207](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-51-0-207).
2. Pashkevich M.A. Ecological security and sustainability / M.A. Pashkevich, A.S. Danilov // Journal of Mining Institute. — 2023. — № 260. — P. 153–154.
3. Белозерцева И.А. Интегральная оценка экологического состояния почвенного покрова при добыче газа в Среднем Приангарье / И.А. Белозерцева // Почвоведение. — 2020. — № 2. — С. 244–258. — DOI: [10.31857/S0032180X20020021](https://doi.org/10.31857/S0032180X20020021).
4. Окомянская В.М. Актуальные вопросы локального экологического мониторинга промышленной площадки на примере нефтегазодобывающего региона / В.М. Окомянская // International Agricultural Journal. — 2022. — № 6. — С. 1084–1102.
5. Galchenko Yu.P. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in lithosphere / Yu.P. Galchenko, V.A. Eremenko // Eurasian Mining. — 2020. — № 1. — P. 30–36.
6. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile / L. Yakovets // Norwegian Journal of Development of the International Science. — 2021. — Vol. 54, Iss. 1. — P. 8–12. — DOI: [10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12](https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12).
7. Гайрабеков У.Т. Геоэкологические аспекты освоения нефтегазовых месторождений в горных и предгорных районах (на примере Чеченской Республики) / У.Т. Гайрабеков // Устойчивое развитие горных территорий. — 2016. — Т. 8, № 2. — С. 312–322. — DOI: [10.21177/1998-4502-2016-8-127-134](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-127-134).
8. Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы / Г.И. Сарапулова // Записки Горного института. — 2020. — Т. 243. — С. 388–392. — DOI: [10.31897/PMI.2020.3.388](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.388).
9. ArcView GIS. Using ArcView GIS : reference book and methods of working with the software product. — Redlands, CA : Environmental Systems Research Institute, 1996.
10. Gizatullin R. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks / R. Gizatullin, M. Dvoynikov, N. Romanova et al. // Energies. — 2023. — Vol. 16, № 5. — P. 1–13.
11. Makwashi N. Study on waxy crudes characterization and chemical inhibitor assessment / N. Makwashi, D. Zhao, M. Abdulkadir [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2021. — Vol. 204. — Art. 108734.
12. Козлов А.А. Методика обнаружения координаты утечки газа как способ повышения безопасности и экологичности эксплуатации магистрального газопровода / А.А. Козлов, И.С. Александров, Р.А. Шестаков // ЭКИП. — 2024. — Т. 28, № 8. — С. 32–37.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Alenichev V.M. Kriterii sistemnoy otsenki izmeneniy prirodno-tekhnologicheskikh sistem pri nedropol'zovanii [Criteria for system assessment of changes in natural-technological systems during subsoil use] / V.M. Alenichev // Gornyy informatsionno-analicheskyy byulleten' [Mining Informational and Analytical Bulletin]. — 2021. — № 5–1. — P. 207–216. — DOI: [10.25018/0236-1493-2021-51-0-207](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-51-0-207). [in Russian]
2. Pashkevich M.A. Ecological security and sustainability / M.A. Pashkevich, A.S. Danilov // Journal of Mining Institute. — 2023. — № 260. — P. 153–154.
3. Belozertseva I.A. Integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya pochvennogo pokrova pri dobyche gaza v Srednem Priangar'ye [Integral assessment of the ecological state of the soil cover during gas production in the Middle Angara



- region] / I.A. Belozertseva // Pochvovedeniye [Eurasian Soil Science]. — 2020. — № 2. — P. 244–258. — DOI: 10.31857/S0032180X20020021. [in Russian]
4. Okomyanskaya V.M. Aktual'nyye voprosy lokal'nogo ekologicheskogo monitoringa promyshlennoy ploshchadki na primere neftegazodobyvayushchego regiona [Topical issues of local environmental monitoring of an industrial site on the example of an oil and gas producing region] / V.M. Okomyanskaya // International Agricultural Journal. — 2022. — № 6. — P. 1084–1102. [in Russian]
5. Galchenko Yu.P. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in lithosphere / Yu.P. Galchenko, V.A. Eremenko // Eurasian Mining. — 2020. — № 1. — P. 30–36.
6. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile / L. Yakovets // Norwegian Journal of Development of the International Science. — 2021. — Vol. 54, Iss. 1. — P. 8–12. — DOI: 10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12.
7. Gairabekov U.T. Geoekologicheskiye aspekty osvoyeniya neftegazovykh mestorozhdeniy v gornykh i predgornykh rayonakh (na primere Chechenskoj Respubliki) [Geoecological aspects of oil and gas field development in mountainous and foothill regions (on the example of the Chechen Republic)] / U.T. Gairabekov // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij [Sustainable Development of Mountain Territories]. — 2016. — Vol. 8, № 2. — P. 312–322. — DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-127-134. [in Russian]
8. Sarapulova G.I. Geokhimicheskij podkhod v otsenke vozdeystviya tekhnogennykh ob"yektov na pochvy [Geochemical approach in assessing the impact of man-made objects on soils] / G.I. Sarapulova // Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]. — 2020. — Vol. 243. — P. 388–392. — DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388. [in Russian]
9. ArcView GIS. Using ArcView GIS : reference book and methods of working with the software product. — Redlands, CA : Environmental Systems Research Institute, 1996.
10. Gizatullin R. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks / R. Gizatullin, M. Dvoynikov, N. Romanova et al. // Energies. — 2023. — Vol. 16, № 5. — P. 1–13.
11. Makwashi N. Study on waxy crudes characterization and chemical inhibitor assessment / N. Makwashi, D. Zhao, M. Abdulkadir [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2021. — Vol. 204. — Art. 108734.
12. Kozlov A.A. Metodika obnaruzheniya koordinaty utechki gaza kak sposob povysheniya bezopasnosti i ekologichnosti ekspluatatsii magistral'nogo gazoprovoda [Method for detecting gas leak coordinates as a way to improve the safety and environmental friendliness of main gas pipeline operation] / A.A. Kozlov, I.S. Alexandrov, R.A. Shestakov // EKIP. — 2024. — Vol. 28, № 8. — P. 32–37. [in Russian]