ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(9):53-66
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.054 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_53

МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ МОНЧЕГОРСКА: ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ

А.С. Данилов[1], Э.А. Кремчеев[2], А.С. Лозовая[1], В.О. Гайдак[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru
[2] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Проблема загрязнения почв селитебных территорий является ключевой в рассмотрении экологической ситуации российской Субарктики. Особенно актуальна задача в отношении моногородов Крайнего Севера. В этой связи проведен мониторинг загрязненных почв города Мончегорска. Результаты негативного воздействия деятельности Кольской горно-металлургической компании отражены в полученных физико-химических свойствах почв, включая уровень кислотности, содержание тяжелых металлов и органических веществ. Установлено значительное превышение предельных допустимых концентраций по никелю и меди, что указывает на формирование на территории накопленного вреда окружающей среде. По результатам мониторинга построены карты загрязнения почв. Отмечена положительная тенденция снижения уровня загрязнения после закрытия металлургического цеха и проведения в ранние годы фиторемедиационных мероприятий. В связи с полученными результатами рекомендовано продолжение использования фиторемедиации, как наиболее перспективного с экономической и экологической точки зрения метода восстановления загрязненных почв.

Ключевые слова: арктическая зона, арктические города, восстановление экосистемы, город Мончегорск, загрязнение почвы, мониторинг, тяжелые металлы, фиторемедиация.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

Для цитирования: *Данилов А. С., Кремчеев Э. А., Лозовая А. С., Гайдак В. О.* Мониторинг загрязнения почв Мончегорска: причины и последствия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9. – С. 53–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_53.

Monitoring soil pollution in the town of Monchegorsk: Causes and consequences

A.S. Danilov[1], E.A. Kremcheev[2], A.S. Lozovaya[1], V.O. Gaydak[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru
[2] HSE University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: Soil pollution in residential areas is a key point of the analysis of ecological situation in Subarctic Russia. The problem is particularly acute in monotowns of the North. In this connection, the soil pollution monitoring was carried out in the town of Monchegorsk. The adverse

© А.С. Данилов, Э.А. Кремчеев, А.С. Лозовая, В.О. Гайдак. 2025.

impact of Kola Mining and Metallurgy Company performance shows up in the physicochemical properties of test soil, including the acidity level, as well as the contents of heavy metals and organic substances. The revealed concentrations of copper and nickel greatly exceed the allowable maximum, which is reflective of a cumulative damage caused to the environment in the test area. As a result of monitoring, the soil pollution maps are created. A decreasing trend is observed in the soil pollution after closure of metallurgical works and earlier phytoremediation. The study results allow recommending phytoremediation as the most ecologically and economically promising method of polluted soil restoration.

Key words: Arctic area, Arctic towns, ecosystem restoration, Monchegorsk town, soil pollution, heavy metals, phytoremediation.

Acknowledgements: The study was carried out under state contract with the Ministry of Science and Higher Education, contract no. FSRW-2024-0005.

For citation: Danilov A. S., Kremcheev E. A., Lozovaya A. S., Gaydak V. O. Monitoring soil pollution in the town of Monchegorsk: Causes and consequences. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(9):53-66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_53.

Введение

Арктическая зона Российской Федерации — важный природоресурсный и геополитический регион. Особое место в арктическом и субарктическом регионе занимает Кольский полуостров — уникальный природный объект с крупным запасом полезных ископаемых. Однако интенсивное промышленное развитие региона привело в ряду экологических проблем. Во многом они связаны с развитием цветной металлургии района, в частности медно-никелевой (г. Мончегорск, г. Заполярный, п. Никель), добычей и обогащением железной руды (г. Ковдор, г. Оленегорск) и апатит-нефелинового сырья (г. Кировск, г. Апатиты) [1, 2]. Экологический кризис представлен не только загрязнением атмосферы, но и деградацией почв. В результате антропогенной деятельности почвенный покров претерпел значительные изменения, в основном в результате химического загрязнения и механических нарушений.

Город Мончегорск Мурманской области представляет собой один из характерных моногородов, типичных для российского Арктического региона, в котором градообразующим предприятием является Кольская горно-металлургическая компания, входящая в состав ПАО «Норникель» [3]. Несмотря на наличие медно-никелевых месторождений в окрестностях города, они оказались недостаточно богатыми, чтобы обеспечить полноценное производство металлов. В Мончегорске расположен рафинировочный цех, где осуществляется процесс разделения доставленного из Норильска файнштейна на никелевый и медный концентраты.

До 2021 г. в составе производственной структуры Кольской горно-металлургической компании (КГМК), находящейся в городе Мончегорске, продолжал функционировать металлургический цех, осуществляющий передел меди по традиционной пирометаллургической схеме: отражательная плавка — конвертирование — анодная плавка. Именно такой передел считается самым «грязным» звеном производственной цепочки. Согласно ИТС 3-2019 (Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 3-2019 «Производство меди»), основные объемы загрязняющих веществ на медепла-

вильных предприятиях приходятся на SO_2, NO_x, CO, неорганическую пыль, а также на металлы и их соединения.

Перечисленные загрязняющее вещества образуются на каждом этапе технологического процесса, однако наиболее значительными источниками выбросов являются процессы обжига, плавки и конвертирования [4].

Л.В. Ромина, исследуя экологическую обстановку Мурманской области, называет города-площадки Кольской горнометаллургической компании (пос. Никель, г. Заполярный и г. Мончегорск) самыми загрязненными в Мурманской области. Такой вывод основан на данных о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу, общий объем которых от производственных площадок компании составляет более 50% всех выбросов региона [5].

В отечественной литературе особое внимание уделяется загрязнению почв в импактной зоне Кольской ГМК и образованию техногенной пустоши в г. Мончегорске [6, 7]. Формирование техногенных пустошей на Кольском полуострове объясняется длительным воздействием выбросов диоксида серы и тяжелых металлов. Загрязнение атмосферного воздуха и почв привели к деградации растительного покрова в радиусе производственных площадок, за счет чего, по данным В.Н. Короткова и соавторов, характерные для данного региона иллювиально-гумусовые подзолы трансформировались в абраземы альфогумусовые, которые характеризуются скудным питательным составом, минимальным количеством органического вещества, большим количеством накопленных тяжелых металлов и сниженной биологической активностью [8—10].

Методы восстановления арктических почв детерминированы суровыми климатическими условиями Крайнего Севера. Применение физических и химических способов восстановления может оказывать негативное воздействие больше, чем прямое загрязнение почв [11, 12]. Так, некоторые химические методы сопровождаются протеканием экзотермических реакций, которые способствуют таянию многолетнемерзлых грунтов, а использование сжигания (физического способа) сопровождается эмиссией продуктов горения в атмосферный воздух [13]. Использование биологических методов рассматривается многими авторами как наиболее перспективный, однако и он ограничен в арктических условиях [14]. Наиболее целесообразным методом восстановления арктических почв на основе общемировых научных достижений является подвид биологического восстановления — фиторемедиация [9, 15].

Помимо проведенных разными исследователями мероприятий по восстановлению загрязненных городских почв, выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников в г. Мончегорске, по официальным данным (Доклад о состоянии и об охраны окружающей среды Мурманской области в 2023 г.), значительно снизились после закрытия металлургического цеха [16].

В 2020 г. общий объем выбросов составил 46,2 тыс. т, в 2021 г. — 19,7 тыс. т, в 2022 г. — 16,7 тыс. т, а в 2023 г. этот показатель снизился до 16,3 тыс. т. Несмотря на явную тенденцию к снижению общего объема выбросов, проблема загрязнения воздуха в городе остается актуальной. Ежегодно регистрируются превышения по ряду загрязняющих веществ, таких как диоксид серы (SO_2), взвешенные вещества, формальдегид и бенз(а)пирен. В 2023 г. превышения максимально разовых концентраций регистрировались при неблагоприятных метеорологических условиях по диоксиду серы (4 ПДК), ок-

сидам азота (1,6 ПДК), формальдегиду (1,1 — 3,7 ПДК). Эти данные указывают на то, что, несмотря на позитивные изменения в сокращении выбросов, экологическая обстановка в городе все еще остается напряженной.

Аналогичная тенденция прослеживается и в отношении загрязнения почв. В 2020 г. 87,7% проб почвы г. Мончегорска не соответствовали гигиеническим нормативам в селитебной зоне по санитарно-химическим показателям, в 2021 г. — 56,5%, 2022 г. — 55,8%, а в 2023 г. этот показатель снизился до 0%. Кроме очевидных превышений нормативов по содержанию в почвах меди и никеля в прошлых годах, отмечались также превышения 1,1 — 2 ПДК по ртути, кадмию, мышьяку и 2,1 — 5 ПДК по бенз(а)пирену [17, 18]. Однако, по результатам комплексного мониторинга Г.М. Кашулиной, проведенного в 2021 г., концентрации никеля и меди в органогенном горизонте подзолов превышают фоновые в сотни-тысячи раз. Эти данные подчеркивают сложность и масштаб проблемы загрязнения почв в регионе, несмотря на улучшение по отдельным показателям [19].

Методы

Для актуализации данных и оценки влияния выбросов Кольской ГМК авторами в 2024 г. исследовались объединенные пробы почв селитебной территории. Участки характеризуются разнородным мезорельефом с вершинными поверхностями, склонами и понижениями (зоны смыва, транзита и аккумуляции) [20]. Преобладающие типы почв: деградированные подзолы иллювиально-железистые с отсутствующими горизонтами и торфяные эутрофные почвы. В соответствие с ежегодником качества атмосферного воздуха на территории г. Мончегорска 2023 г. преобладающи-

Рис. 1. Пробные площадки (составлено авторами)
Fig. 1. Test sites (compiled by the authors)

ми направлениями ветра стали юго-западное (27%) и северное (25%).

С учетом этих данных была построена карта проботбора (рис. 1), на которую были нанесены лучи, совпадающие с преобладающим направлением ветра. На пересечении лучей и расположились ключевые участки, на которых производился отбор проб.

Согласно ГОСТ Р 58595-2019 (ГОСТ Р 58595-2019 «Почвы. Отбор проб») территория, предназначенная для обследования, была разбита на элементарные участки и определено расстояние между точечными (единичными) пробами.

Отбор слоя почвы производился равномерно по территории города на глубине 0 — 20 см полиэтиленовым шпателем. Объединенная проба была очищена от камней, листьев и травы, высушена до воздушно-сухого состояния.

В каждой пробе были определены физико-химические свойства (pH солевой и водной вытяжек), содержание сульфатов, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, P, Pb, S, Ti, V, Zn, Zr, Sr, Rb, Se.

Определение pH солевой и водной вытяжек производился согласно ГОСТ 26423-85 (ГОСТ 26423-85 «Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки»). Валовые концентрации загрязнителей были измерены с использованием портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра Niton и методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на ICPE-9000 (Shimadzu) согласно М-02-1109-09 (Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии М-МВИ-80-2008). Определение массовой доли органических веществ на абсолютно сухое состояние в пробах почв проводилось в соответствии с ГОСТ 23740-2016 (ГОСТ 23740-2016 «Грунты. Методы определения содержания органических веществ»).

В исследование отсутствуют собственные фоновые участки. Естественные уровни определяемых показателей были приняты по литературным источникам. При этом было проведено сравнение исследуемых параметров с результатами прошлых лет до закрытия металлургического цеха Колькой ГМК и проведения ряда мероприятий по восстановлению городских почв.

Результаты и их обсуждение

pH

По разным исследованиям, проводимым до остановки металлургического цеха в 2021 г. (исследования 2011, 2015 и 2018 гг.), pH водной вытяжки верхних горизонтов отмечается в среднем 4,1 — 4,2, с глубиной данный показатель увеличивается в среднем до 5,4, что является следствием продолжающегося подкисления почв и их загрязнения тяжелыми металлами.

Результаты проводимого авторами исследования в 2024 г. приведены в табл. 1.

Показания водной вытяжки характеризуют актуальную кислотность почв, сравнивая эти значения с исследованиями прошлых лет, можно сделать вывод о том, что в результате снижения негативного воздействия после закрытия металлургического цеха, а также вследствие приводимой в разные периоды ремедиации техногенных пустошей, реакция почв стремится к нейтральной [21, 22]. Однако показания солевой вытяжки характеризуют обменную кислотность почв и имеют более низкие значения, что подтверждается экспериментом.

Именно по данному показателю целесообразно проводить градацию почв по кислотности. Согласно проведенному анализу, почвы г. Мончегорска характеризуются как слабокислые и близкие

Таблица 1

Результаты анализа pH водной и солевой вытяжек в почвах г. Мончегорск в 2024 г. (составлено авторами)
Results of the pH analysis of aqueous and salt extracts in the soils of Monchegorsk in 2024 (compiled by the authors)

№ пробы	pH водной вытяжки	pH солевой вытяжки
1	4,8*	3,4*
2	7,8	6,7
3	6,3	4,6
4	6,6	5,3
5	6,3	4,7
6	5,3	4,4
7	7,7	6,8
8	6,5	5,0
9	6,2	5,1
10	5,1	4,5
11	6,1	5,2
12	5,1	4,7
13	6,1	4,6
14	7,2	6,1
15	7,1	6,1
16	6,9	6,0
17	6,9	6,2
18	7,4	6,4
19	6,3	5,1
20	8,7	7,5
21	6,6	5,2
22	7,1	6,5
23	6,7	5,0
24	5,4	4,0
25	5,7	4,8
ср. в селитебной зоне	6,3	5,2

* погрешность измерений ±0,05.

к нейтральным, что также подтверждает положительную тенденцию. Самыми низкими показателями водной и соляной вытяжки обладают пробы № 1, № 3 — 5, 9 — 13, 24, 25.

Валовое содержание веществ

В качестве критериев для сравнения полученных результатов по валовому содержанию веществ целесообразно использовать ПДК/ОДК. Для тех веществ, по которым не установлены нормативы, в качестве критерия для сравнения были приняты фоновые показатели, описанные в трудах Г.Н. Копцик и соавторов [6, 7]. Для предварительной оценки степени загрязнения почв был выполнен анализ проб рентгено-флуоресцентным методом. На основании полученных результатов сформирован перечень элементов для количественного определения их содержаниям методом атомно-эмиссионной спектрометрии.

Результаты валового содержания химических элементов в городских почвах Мончегорска, выявленных в 2024 г., методом атомно-эмиссионной спектрометрии приведены в табл. 2.

Анализируя сведения, приведенные в табл. 2 можно сделать вывод о том, что превышения нормативов в городских почвах Мончегорска не отмечается по марганцу, свинцу, сере и цинку. По остальным элементам наблюдаются экстремальные превышения в сотни и тысячи раз.

Наиболее показательным с точки зрения выявления источника загрязнения почв и формирования техногенной аномалии является карта распространения маркерных веществ — меди и никеля [23].

На рис. 2 и 3 приведена картина распространения загрязнения указанными элементами почв городской территории относительно ПДК.

Сохранившиеся, несмотря на проведенные природоохранные мероприятия Кольской ГМК, экстремально высокие концентрации меди и никеля в почвах Мончегорска позволяют сделать вывод о формировании на этой территории накопленного ущерба окружающей среде [24, 25]. Его устранение требует под-

Таблица 2

Валовое содержание веществ в почвах г. Мончегорска в 2024 г., выявленное методом АЭС (составлено авторами)

Total content of substances in the soils of Monchegorsk in 2024, determined by the AES method (compiled by the authors)

№ пробы	Ca, мг/кг	Co, мг/кг	Cr, мг/кг	Cu, мг/кг	Fe, мг/кг	K, мг/кг	Mg, мг/кг	Mn, мг/кг	Ni, мг/кг	P, мг/кг	Pb, мг/кг	S, мг/кг	Ti, мг/кг	V, мг/кг	Zn, мг/кг
1	26 762*	72*	200*	455*	19 220*	9783*	10 344*	347*	527*	390*	менее 25*	46*	2016*	43*	37*
2	27 564	40	785	58	36 843	13 594	19 949	606	201	238	менее 25	12	1748	67	79
3	21 874	60	1596	168	43 700	9349	45 862	835	480	316	менее 25	10	1461	70	55
4	33 262	35	281	106	32 771	15 901	12 683	488	262	226	менее 25	6,5	1836	67	48
5	27 706	37	117	39	28 550	16 372	9811	441	61	206	менее 25	8,3	1673	58	36
6	28 911	36	394	200	40 818	11 248	17 801	603	229	342	менее 25	19	2166	80	47
7	31 059	30	299	64	32 627	14 752	12 909	498	126	205	менее 25	11	1701	64	46
8	32 181	34	224	111	35 234	14 109	11 737	534	185	297	менее 25	10	2145	75	43
9	28 623	70	235	3135	34 374	12 309	16 683	487	1269	425	131	51	1753	80	87
10	34 483	37	261	417	40 767	13 897	12 931	573	281	322	менее 25	18	2471	89	44
11	38 715	36	340	198	38 463	13 243	15 116	559	325	233	менее 25	12	1933	74	40
12	31 435	26	159	69	40 673	16 163	11 627	470	76	164	менее 25	4,8	1556	59	30
13	31 110	47	694	231	40 670	12 829	12 667	571	1175	183	менее 25	6,0	1923	64	32
14	35 929	39	677	199	39 150	12 083	28 511	553	350	491	менее 25	18	1650	66	61
15	28 851	41	1018	266	49 515	10 637	28 624	754	383	209	менее 25	16	1597	72	70
16	27 398	32	416	153	31 004	13 070	13 127	421	189	426	менее 25	23	1483	57	56
17	26 296	28	340	51	27 523	14 522	15 786	396	97	142	менее 25	5,7	1140	48	29
18	42 881	26	139	52	32 149	14 575	8821	439	57	160	менее 25	3,1	1485	62	39
19	35 454	26	144	40	32 270	14 566	8922	441	57	155	менее 25	4,2	1481	64	39
20	32 798	34	435	294	42 766	11 313	14 751	547	250	506	менее 25	26	2265	79	85
21	33 952	45	440	122	44 952	11 911	18 204	572	214	447	менее 25	23	2137	79	176
22	31 109	35	442	138	52 114	13 499	24 952	519	216	277	менее 25	20	1773	65	42
23	28 567	24	143	64	26 625	16 727	10 459	361	75	136	менее 25	4,1	1251	49	29
24	31 431	37	235	424	34 355	11 931	15 160	415	502	583	менее 25	37	1705	63	58
25	33 559	81	346	154	51 922	10 154	16 616	607	233	353	менее 25	18	3207	107	57
СР. в селитебной зоне	31 276	40	414	288	37 162	12 141	16 562	522	313	297	–	16	1822	68	55

* Погрешность измерений ±30%.

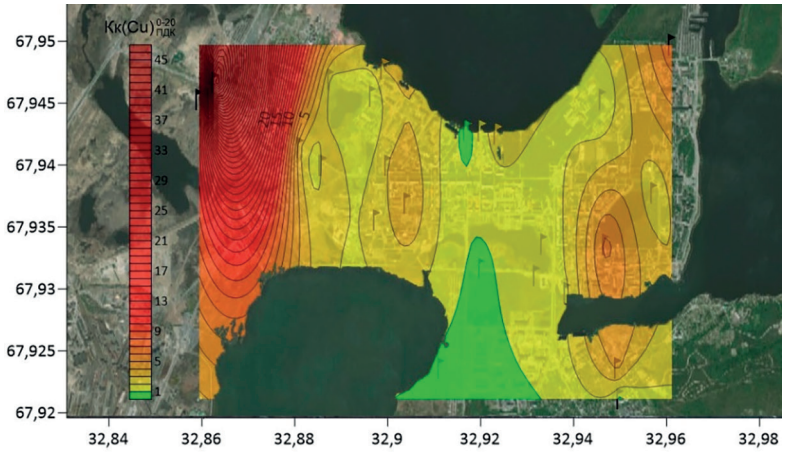

Рис. 2. Карта загрязнения почвенного слоя Cu (валовая форма) относительно ПДК (составлено авторами)

Fig. 2. Map of contamination of the Cu soil layer (gross form) relative to the MPC (compiled by the authors)

бора наиболее устойчивых к высоким концентрациям ЗВ и неблагоприятным климатическим условиям растений-ремедиантов для проведения комплексного восстановления загрязненных почв.

Массовая доля органических веществ

По данным В.Н. Короткова и соавторов городские почвы Мончегорска обеднены органическим веществом за счет эрозии верхнего органогенного и подзолистого горизонтов [10]. При этом, ученые Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова отмечают, что именно верхний органический горизонт служит основным геохимическим барьером на пути миграции меди из атмосферы в городские почвогрунты. По данным авторов медь активно адсорбируется гуминовыми и фуль-

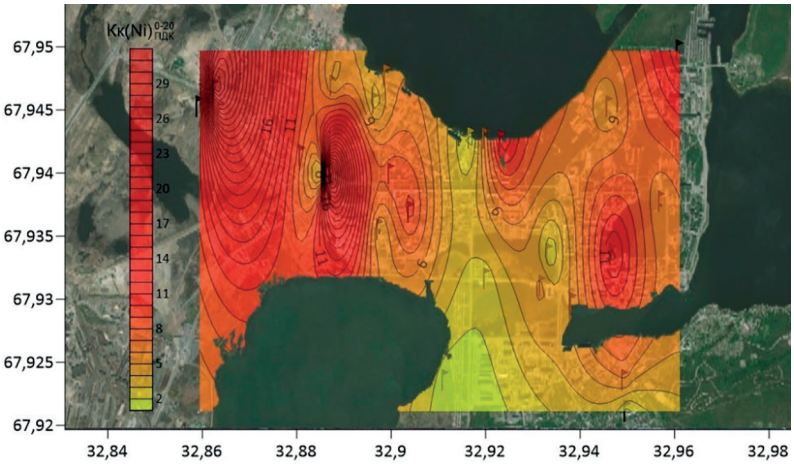

Рис. 3. Карта загрязнения почвенного слоя Ni (валовая форма) относительно ПДК (составлено авторами)

Fig. 3. Map of contamination of the Ni soil layer (gross form) relative to the MPC (compiled by the authors)

вокислотами [26]. В табл. 3 приведены результаты определения массовой доли органических веществ на абсолютно сухое состояние в 2024 г..

По данным табл. 3, наибольшим количеством органического вещества обладают почвы проб № 1, № 6, № 9, № 24. При этом в данных пробах отмечаются повышенные концентрации Co, Ti, Cu, Ni, это обусловлено тем, что ТМ могут образовывать металлоорганические комплексы с подвижными низкомолекулярными органическими соединениями [27, 28].

Заключение

Результаты исследований, направленные на анализ эффективности использования фиторемедиации городских почв Мончегорска, позволили сделать следующие выводы:

1. Кислотность почв селитебной зоны заметно снижается, самыми низкими показателями pH характеризуются почвы, отобранные на максимальном удалении от источника воздействия, в северо-восточной и восточной частях города;

2. Валовое содержание химических элементов в городских почвах остается экстремально высоким, особенно высоко содержание Ni и Cu. Не отмечены превышения по Mn, Pb, S, Zn;

3. Органическое вещество в почвах выступает геохимическим барьером для накопления тяжелых металлов.

Результаты проведенных исследований показывают, что в условиях высокого и длительного загрязнения окружающей среды естественное восстановление техногенных пустошей практически невозможно за счет осложненных климатических условий.

Несмотря на снижение выбросов вредных веществ в последние десятилетия, экологическая ситуация в зоне воздействия Кольской ГМК остается крайне напряженной. Сокращение выбросов и проведенная в разные годы фиторемедиация хоть и оказывают позитивное влияние на качество городских почв, оказываются недостаточными для полного их восстановления.

Таблица 3

Массовая доля органических веществ в почвах г. Мончегорска в 2024 г. (составлено авторами)
Mass fraction of organic substances in the soils of Monchegorsk in 2024 (compiled by the authors)

№ пробы	Массовая доля органического вещества, %
1	24,40 ± 5%
2	1,37 ± 20%
3	2,30 ± 20%
4	1,28 ± 20%
5	0,81 ± 20%
6	6,17 ± 10%
7	1,27 ± 20%
8	2,00 ± 20%
9	11,22 ± 10%
10	2,21 ± 20%
11	1,38 ± 20%
12	1,03 ± 20%
13	2,20 ± 20%
14	3,51 ± 15%
15	2,04 ± 20%
16	5,13 ± 10%
17	0,46 ± 20%
18	0,42 ± 20%
19	4,99 ± 15%
20	0,53 ± 20%
21	3,53 ± 15%
22	3,29 ± 15%
23	0,77 ± 20%
24	10,57 ± 10%
25	7,05 ± 10%
СР. в селитебной зоне	4,00 ± 15%

Для решения этой проблемы, наряду с дальнейшими природоохранными мероприятиями Кольской ГМК, необходимо дальнейшее использование фиторемедиации. В условиях Крайнего Севера традиционные методы рекультивации, включая механические и химические способы очистки, обладают рядом ограничений. Их применение может негативно сказаться на многолетнемерзлых грунтах, а высокие экономические издержки делают их менее целесообразными. В этом контексте наиболее перспективным методом является фиторемедиация — экологически безопасная технология, основанная на способности растений извлекать и трансформировать загрязнители. Поиск перспективных растений-ремедиантов является темой дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванова Л. А.*, *Слуковская М. В.*, *Красавцева Е. А.* Оценка эффективности использования осадка сточных вод для рекультивации нарушенных территорий в Кольской субарктике (на примере песчаного карьера) // Записки Горного института. — 2024. — Т. 267. — С. 444—452.

2. *Иванова Л. А.* Инновационные газонные технологии для улучшения окружающей среды Арктики / Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси. В 2-х частях. Ч. 2. — 2017. — С. 470—473.

3. *Благовидова Н. Г.*, *Девятов Д. В.* Применение экосистемного подхода к регенерации нарушенных городских территорий г. Мурманска // Architecture and Modern Information Technologies. — 2024. — № 4 (69). — С. 239—255. DOI: 10.24412/1998-4839-2024-4-239-255.

4. *Trojanowska M.* Reclamation of polluted land in urban renewal projects. Literature review of suitable plants for phytoremediation // Environmental Challenges. 2023, vol. 13, article 10074. DOI: 10.1016/j.envc.2023.100749.

5. *Ромина Л. В.* Экологические проблемы Кольского полуострова // Жизнь Земли. — 2014. — Т. 35–36. — С. 76—81.

6. *Копцик Г. Н.*, *Копцик С. В.*, *Смирнова И. Е.*, *Синичкина М. А.* Влияние деградации и ремедиации почв техногенных пустошей на поглощение элементов питания и тяжелых металлов растениями в Кольской Субарктике // Почвоведение. — 2021. — № 8. — С. 969—982.

7. *Копцик Г. Н.*, *Копцик С. В.*, *Смирнова И. Е.*, *Синичкина М. А.* Ремедиация почв техногенных пустошей в Кольской субарктике: современное состояние и многолетняя динамика // Почвоведение. — 2021. — № 4. — С. 489—501.

8. *Чукаева М. А.*, *Пухальский Я. В.*, *Лоскутов С. И.*, *Сидорова В. Р.*, *Воропаева Е. В.*, *Матвеева В. А.* Оценка изменения фитоэкстракции тяжелых металлов бархатцами прямостоячими (Tagetes erecta) из загрязненных почв Норильска при использовании гуминовых добавок // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14. — № 1. — С. 90—102. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-90-102.

9. *Пухальский Я. В.*, *Воробьев Н. И.*, *Лоскутов С. И.*, *Чукаева М. А.*, *Сидорова В. Р.*, *Матвеева В. А.* Нейросетевой когнитивный анализ аккумуляции тяжелых металлов растениями бархатцы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2024. — Т. 515. — № 2. — С. 304—314.

10. *Коротков В. Н.*, *Копцик Г. Н.*, *Смирнова И. Е.*, *Копцик С. В.* Восстановление растительности на техногенных пустошах в окрестностях Мончегорска (Мурманская область, Россия) // Russian journal of ecosystem ecology. — 2019. — Т. 4 (1). — С. 1—18.

11. *Samuel Wiafe, Sarah Fanny Hackman Duncan, Ebenezer Boakye, Samuel Yeboah Baako* The effect of soil types on the phytoremediation of heavy metals by Phragmites australis // Journal of Environmental Engineering and Science. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 36—42. DOI: 10.1680/jenes.22.00020.

12. *Капелькина Л. П.* Технологические аспекты рекультивации нарушенных земель на севере России // Проблемы региональной экологии. — 2021. — № 5. — С. 96—99. DOI: 10.24412/1728-323X-2021-5-96-99.

13. *Слуковская М. В., Новичонок Е. В., Кременецкая И. П., Мосендз И. А., Дрогобужская С. В., Марковская Е. Ф.* Применение Festuca rubra L. в фиторемедиации: комплексная оценка влияния техногенного грунта на растение // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. — 2017. — № 4 (165). — С. 70—80.

14. *Петрова Т. А., Рудзиш Э.* Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 251. — С. 767—776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.

15. *Парфенова А. Е.* Фиторемедиация почвенных покровов, загрязненных солями тяжелых металлов. Аналитический обзор // Экосистемы. — 2023. — № 35. — С. 64—73.

16. *Опекунова М. Г., Елсукова Е. Ю., Чекушин В. А., Томилина О. В., Салминен Р., Рейманн К.* Мониторинг изменения состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината «Североникель». I. Миграция и аккумуляция химических элементов в почвогрунтах г. Мончегорска // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. — 2006. — № 2. — С. 96—102.

17. *Денисов А. А., Моторин А. С.* Температурный режим песчаных грунтов лесотундровой зоны Крайнего Севера // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2021. — № 7(201). — С. 21—28.

18. *Евдокимова Г. А., Калабин Г. В., Мозгова Н. П.* Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия воздушных выбросов комбината «Североникель» // Почвоведение. — 2011. — № 2. — С. 261—268.

19. *Кашулина Г. М.* Комплексный мониторинг окружающей среды около медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. — 2022. — № 5. — С. 556—570.

20. *Ершов В. В.* Мониторинг состава атмосферных и почвенных вод в лесных экосистемах: достижения и перспективы // Вопросы лесной науки. — 2020. — № 2. — С. 1—34.

21. *Алексеенко В. А., Швыдкая Н. В., Алексеенко А. В., Мачевариани М. М.*, Бех Дж., *Пашкевич М. А., Рока Н.* Закономерности накопления элементов местными видами растений в условиях естественного геохимического стресса // Растения. — 2021. — № 10(1). — С. 1—18. DOI: 10.3390/plants10010033.

22. *Korelskiy D. S., Strizhenok A. V., Ismailova D. V.* Development and justification of the method of biotechnological reclaiming of oil-contaminated land // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 15, no. 3, pp. 342—353.

23. *Дворников Ю. А., Слуковская М. В., Ярославцев А. М., Мешалкина Ю. Л., Саржанов Д. А., Васенев В. И.* Крупномасштабное картографирование загрязнения почв тяжелыми металлами (Cu, Ni) на участке техногенной пустоши (г. Мончегорск) на основе полевых pXRF-измерений и данных дистанционного зондирования // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2022. — № 19. — С. 92—97.

24. *Рыженков А. Я.* О необходимости ликвидации объектов накопленного экологического вреда для перехода России к «зеленой» экономике // Актуальные проблемы российского права. — 2022. — Т. 17. — № 3. — С. 160—169. DOI: 10.17803/1994-1471.2022.136.3.160-169.

25. *Сарапулова Г. И.* Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. — 2020. — Т. 243. — С. 388—392. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388.

26. *Котова Е. И., Кузнецова И. А., Кряучюнас В. В., Игловский С. А., Мироненко К. А., Бедрина Д. Д.* Пространственное распределение меди, ванадия, никеля и свинца в почвах города Мончегорска // Advances in current natural sciences. — 2019. — № 12. — С. 70—76.

27. *Лянгузова И. В., Примак П. А., Салихова Ф. С., Волкова Е. Н., Беляева А. И.* Воздействие загрязнения почв тяжелыми металлами на пространственное распределение биомассы напочвенного покрова и запаса лесной подстилки в сосновых лесах Кольского полуострова // Растительные ресурсы. — 2021. — Т. 57. — № 4. — С. 340—358. DOI: 10.31857/S0033994621040087.

28. *Dzhevaga N., Lobacheva O.* Reduction in technogenic burden on the environment by flotation recovery of rare earth elements from diluted industrial solutions // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 16, article 7452. DOI: 10.3390/app11167452. ГИАБ

REFERENCES

1. Ivanova L. A., Slukovskaya M. V., Krasavtseva E. A. Evaluation of the effectiveness of using sewage sludge for the reclamation of disturbed areas in the Kola Subarctic (using the example of a sand quarry). *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 267, pp. 444—452. [In Russ].

2. Ivanova L. A. Innovative lawn technologies for improving the Arctic environment. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu Tsentral'nogo botanicheskogo sada Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 85th anniversary of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus], part 2, 2017, pp. 470 — 473. [In Russ].

3. Blagovidova N. G., Devyatov D. V. Application of an ecosystem approach to regeneration of disturbed urban areas in Murmansk. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2024, no. 4 (69), pp. 239 — 255. [In Russ]. DOI: 10.24412/1998-4839-2024-4-239-255.

4. Trojanowska M. Reclamation of polluted land in urban renewal projects. Literature review of suitable plants for phytoremediation. *Environmental Challenges*. 2023, vol. 13, article 10074. DOI: 10.1016/j.envc.2023.100749.

5. Romina L. V. Ecological problems of the Kola Peninsula. *Zhizn' Zemli*. 2014, vol. 35–36, pp. 76 — 81. [In Russ].

6. Koptsik G. N., Koptsik S. V., Smirnova I. E., Sinichkina M. A. The effect of soil degradation and remediation in man-made wastelands on the absorption of nutrients and heavy metals by plants in the Kola Subarctic. *Eurasian Soil Science*. 2021, no. 8, pp. 969 — 982. [In Russ].

7. Koptsik G. N., Koptsik S. V., Smirnova I. E., Sinichkina M. A. Remediation of soils of technogenic wastelands in the Kola Subarctic: current state and long-term dynamics. *Eurasian Soil Science*. 2021, no. 4, pp. 489 — 501. [In Russ].

8. Chukaeva M. A., Puhalsky Y. V., Loskutov S. I., Sidorova V. R., Voropaeva E. V., Matveeva V. A. Assessment of changes in the heavy-metal phytoextraction by Tagetes erecta from contaminated soils of Norilsk using humic additives. *Arctic: Ecology and Economy*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 90 — 102. [In Russ]. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-90-102.

9. Puhalsky Ya. V., Vorobyov N. I., Loskutov S. I., Chukaeva M. A., Sidorova V. R., Matveeva V. A. Neural network cognitive analysis of heavy metal accumulation by marigold plants. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2024, vol. 515, no. 2, pp. 304 — 314. [In Russ].

10. Korotkov V. N., Koptsik G. N., Smirnova I. E., Koptsik S. V. Vegetation restoration on man-made wastelands in the vicinity of Monchegorsk (Murmansk region, Russia). *Russian journal of ecosystem ecology*. 2019, vol. 4 (1), pp. 1 — 18. [In Russ].

11. Samuel Wiafe, Sarah Fanny Hackman Duncan, Ebenezer Boakye, Samuel Yeboah Baako The effect of soil types on the phytoremediation of heavy metals by Phragmites australis. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2022, vol. 18, no. 1, pp. 36 — 42. DOI: 10.1680/jenes.22.00020.

12. Kapelkina L. P. Technological aspects of recultivation of disturbed lands in the north of Russia. *Regional environmental issues*. 2021, no. 5, pp. 96 — 99. [In Russ]. DOI: 10.24412/1728-323X-2021-5-96-99.

13. Slukovskaya M. V., Novichonok E. V., Kremenetskaya I. P., Mosendz I. A., Drogobuzhskaya S. V., Markovskaya E. F. Application of Festuca rubra L. in phytoremediation: a comprehensive assessment of the impact of man-made soil on a plant. *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2017, no. 4 (165), pp. 70 — 80. [In Russ].

14. Petrova T. A., Rudzish E. Recultivation of technogenically disturbed lands using sewage sludge as meliorants. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 251, pp. 767 — 776. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.

15. Parfenova A. E. Phytoremediation of soil covers contaminated with heavy metal salts. Analytical review. *Ecosystems*. 2023, no. 35, pp. 64 — 73. [In Russ].

16. Opekunova M. G., Yelsukova E. Yu., Chekushin V. A., Tomilina O. V., Salminen R., Reimann K. Monitoring of environmental changes in the zone of influence of the Severonickel plant. I. Migration and accumulation of chemical elements in soils of Monchegorsk. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2006, no. 2, pp. 96 — 102. [In Russ].

17. Denisov A. A., Motorin A. S. Temperature regime of sandy soils of the forest-tundra zone of the Far North. *Bulletin of Altai state agricultural university*. 2021, no. 7(201), pp. 21 — 28. [In Russ].

18. Evdokimova G. A., Kalabin G. V., Mozgova N. P. The content and toxicity of heavy metals in the soils of the zone of exposure to air emissions of the Severonickel plant. *Eurasian Soil Science*. 2011, no. 2, pp. 261 — 268. [In Russ].

19. Kashulina G. M. Integrated environmental monitoring near the copper-nickel enterprise on the Kola Peninsula. *Eurasian Soil Science*. 2022, no. 5, pp. 556 — 570. [In Russ].

20. Ershov V. V. Monitoring of atmospheric and soil water composition in forest ecosystems: achievements and prospects. *Forest Science Issues*. 2020, no. 2, pp. 1 — 34. [In Russ].

21. Alekseenko V. A., Shvydkaya N. V., Alekseenko A. V., Machevariani M. M., Bech J., Pashkevich M. A., Roca N. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress. *Plants*. 2021, no. 10(1), pp. 1 — 18. [In Russ]. DOI: 10.3390/plants10010033.

22. Korelskiy D. S., Strizhenok A. V., Ismailova D. V. Development and justification of the method of biotechnological reclaiming of oil-contaminated land. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 15, no. 3, pp. 342 — 353.

23. Dvornikov Yu. A., Slukovskaya M. V., Yaroslavtsev A. M., Meshalkina Yu. L., Sarzhanov D. A., Vasenev V. I. Large-scale mapping of soil pollution with heavy metals (Cu, Ni) in a technogenic wasteland area (Monchegorsk) based on pXRF field measurements and remote sensing data. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*. 2022, no. 19, pp. 92 — 97. [In Russ].

24. Ryzhenkov A. Ya. On the need to eliminate objects of accumulated environmental damage for Russia's transition to a «green» economy. *Actual Problems of Russian Law*. 2022, vol. 17, no. 3, pp. 160 — 169. [In Russ]. DOI: 10.17803/1994-1471.2022.136.3.160-169.

25. Sarapulova G. I. Geochemical approach in assessing the impact of man-made objects on soils. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 243, pp. 388 — 392. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388.

26. Kotova E. I., Kuznetsova I. A., Kryauchiunas V. V., Iglovsky S. A., Mironenko K. A., Bedrina D. D. Spatial distribution of copper, vanadium, nickel and lead in soils of the city of Monchegorsk. *Advances in current natural sciences*. 2019, no. 12, pp. 70 — 76. [In Russ].

27. Lyanguzova I. V., Primak P. A., Salikhova F. S., Volkova E. N., Belyaeva A. I. The impact of soil pollution by heavy metals on the spatial distribution of ground cover biomass and forest litter reserves in pine forests of the Kola Peninsula. *Rastitelnye resursy*. 2021, vol. 57, no. 4, pp. 340 — 358. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0033994621040087.

28. Dzhevaga N., Lobacheva O. Reduction in technogenic burden on the environment by flotation recovery of rare earth elements from diluted industrial solutions. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 16, article 7452. DOI: 10.3390/app11167452.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Данилов Александр Сергеевич[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2108-2781,
Кремчеев Эльдар Абдоллович — д-р техн. наук, профессор,
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»,
e-mail: kremcheev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3195-6641,
Лозовая Александра Сергеевна[1] — стажер-исследователь,
e-mail: allex13lllozovaya@mail.ru,
Гайдак Вероника Олеговна[1] — инженер,
e-mail: gaidakver@gmail.com,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Данилов А.С., e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Danilov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2108-2781,
E.A. Kremcheev, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
HSE University, 198088, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: kremcheev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3195-6641,

A.S. Lozovaya[1], Intern Researcher,
e-mail: allex13lllozovaya@mail.ru,
V.O. Gaydak[1], Engineer, e-mail: gaidakver@gmail.com,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.S. Danilov, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 15.03.2025; получена после рецензии 05.05.2025; принята к печати 10.08.2025.
Received by the editors 15.03.2025; received after the review 05.05.2025; accepted for printing 10.08.2025.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО ОСВОЕНИЯ НЕТРОНУТЫХ ЗАЛЕЖЕЙ, ОСТАВЛЕННЫХ В ЗОНЕ ОБРУШЕНИЯ ЖЕЗКАЗГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

(2025, № 6, СВ 10, 20 с.)

Бекбергенов Досанбай Калдарбаевич — канд. техн. наук, зав. лабораторией,
Институт горного дела им. Д. А. Кунаева, Казахстан, e-mail: kdbekbergen@mail.ru,
Савич Игорь Николаевич — докт. техн. наук, профессор, НИТУ МИСИС,
Зейнуллин Абдикарим Абжалелович — докт. техн. наук, профессор,
Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Казахстан.

Отработка оставшихся запасов руд из нетронутых залежей, находящихся в обрушенной зоне, на сегодняшний день, является одной из ключевых и актуальных проблем Жезказганского месторождения. С учетом данной ситуации рекомендуется применение подземной технологии добычи со сплошной системой разработки обрушения и торцевым выпуском руды, которая является наиболее «инерционным» технологическим решением, отличающееся при существующих обычных условиях разработки (отсутствие зон обрушения). Данная технология исключает возможность образования технологического камерного пространства, и соответственно это исключает доступ людей и оборудования. Для безопасного ведения подземных горных работ требуется проходка буро-доставочных штреков с малыми сечениями, позволяющая выполнение анкерного и паралелльно крепления арочного рамного металлического специального профиля. Далее, проводится бурение веерных скважин для отбойки и доставки горной массы, а также устанавливается оборудование для непрерывного и постоянного геомеханического контроля массива пород вокруг буро-доставочного штрека на данном участке месторождения. Для рациональной отработки в данных горнотехнических условиях нетронутых залежей представлены возможные варианты схем расположения буро-доставочных штреков, позволяющие получить более оптимальные значения показателей извлечения руды в условиях зоны обрушения на примере Жезказганского месторождения Казахстана.

Ключевые слова: технологическое решение, подземное освоение, нетронутые залежи, зона обрушения, Жезказганское месторождение Казахстана, сплошная система разработки обрушения, торцевой выпуск руды, металлическая рамная арочная крепь, анкерное крепление, буро-доставочный штрек.

A TECHNOLOGICAL SOLUTION FOR THE UNDERGROUND DEVELOPMENT OF UNTOUCHED DEPOSITS LEFT IN THE AREA OF THE ZHEZKAZGAN DEPOSIT COLLAPSE

D.K. Bekbergenov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, D.A. Kunaev Institute of Mining, e-mail: kdbekbergen@mail.ru,
I.N. Savich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,
A.A. Zeynullin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kazakh University of Technology and Business named after K.Kulazhanov.

The development of the remaining ore reserves from the untouched deposits located in the collapsed zone is currently a key urgent problem of the Zhezkazgan deposit. In the work, taking into account this situation, it is recommended to use underground mining technology with a continuous collapse mining system and an end discharge of ore, which is the most “inertial” technological solution, which differs under existing normal mining conditions (absence of collapse zones). This recommended technology eliminates the technological chamber space, which eliminates the access of people and equipment. For the safe conduct of underground mining, drilling and delivery shafts with small cross-sections are required, which allows anchoring and parallel fastening of an arched metal frame profile. Next, fan wells are drilled to remove and deliver rock mass, and equipment is being installed for continuous and permanent geomechanical monitoring of the rock mass around the drilling and delivery shaft at this site of the deposit. For rational mining of untouched deposits in these mining conditions, possible schemes for the location of drilling and delivery shafts are presented, which make it possible to obtain more optimal values of ore extraction indicators in the collapse zone using the example of the Zhezkazgan deposit in Kazakhstan.

Key words: Technological solution, underground development, untouched deposits, collapse zone, Zhezkazgan deposit of Kazakhstan, continuous collapse mining system, end ore release, metal frame arch support, anchor fastening, drilling and delivery drift.