

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕПОНИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОЙ ПЫЛИ ДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОТОКАХ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Ю.П. Галченко,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

Аннотация: Действующая технологическая парадигма развития минерально-сырьевого комплекса основана на разрушении вещества литосферы за счёт использования механической энергии или энергии взрыва, что неизбежно порождает мощный поток различных видов техногенных загрязнителей, поступающий в атмосферу нашей планеты. При современной динамике изменения объёмов добычи полезных ископаемых масштаб этих поступлений угрожающе нарастает, обретая постепенно глобальный характер. Поиск путей устранения этих экологических проблем требует детального изучения не только физических процессов, порождающих твёрдые минеральные частицы при использовании горных технологий, но и, в первую очередь, тех особенностей их транзита и детонирования в геосферах Земли, которые превращают эти выбросы в экологическую проблему.

В работе рассмотрены экологические аспекты загрязнения природных водотоков минеральной пылью от взрывной отбойки на горных предприятиях. Показано, что характер и форма взаимодействия техногенных и природных компонентов определяются не только применяемой геотехнологией, но и особенностями строения речной системы, климатом региона, расположением добывающих предприятий, а также — гранулометрическим и минеральным составом техногенных поступлений в водную среду. Выдвинута и разработана гипотеза о зависимости формы депонирования тонкодисперсных минеральных частиц в природных водотоках от климатических особенностей региона. Обоснована и впервые создана методика интегральной оценки последствий кумулятивного накопления минеральных взвесей в водной среде при различных схемах расположения добывающих предприятий. Доказано, что концентрация твёрдых частиц во взвешах возрастает прямо пропорционально снижению порядка водотока в общей иерархии речной системы.

Ключевые слова: добывающие предприятия, технологические аэрозоли, транзит, депонирование, природные экосистемы, структура, поверхностные водотоки, климат, седиментация, частицы, экологические последствия.

Благодарность: Исследования проведены в рамках мероприятия № 1 Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 года № 1144-р, и соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидии в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации № 075-15-2022-1185 от 28 сентября 2022 года.

Для цитирования: Галченко Ю. П. Экологические аспекты депонирования минеральной пыли добывающих предприятий в поверхностных водотоках природных экосистем // Маркшейдерия и недропользование. 2023. №6. С. 82-86.
DOI: 10.56195/20793332_2023_6_82_86.

ECOLOGICAL ASPECTS OF MINERAL DUST DEPOSITION OF MINING ENTERPRISES IN SURFACE WATERCOURSES OF NATURAL ECOSYSTEMS

Yu.P. Galchenko,

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract: The current technological paradigm of the development of the mineral resource complex is based on the destruction of the substance of the lithosphere through the use of mechanical energy or explosion energy, which inevitably generates a powerful flow of various types of man-made pollutants entering the atmosphere of our planet. With the current dynamics of changes in the volume of mineral extraction, the scale of these revenues is threateningly increasing, gradually acquiring a global character. The search for ways to eliminate these environmental problems requires a detailed study of not only the physical processes that generate solid mineral particles when using mining technologies, but also, first of all, those features of their transit and detonation in the geospheres of the Earth that turn these emissions into an environmental problem.

The paper considers the environmental aspects of pollution of natural watercourses with mineral dust from blasting at mining enterprises. It is shown that the nature and form of interaction of technogenic and natural components are determined not only by the applied geotechnology, but also by the features of the structure of the river system, the climate of the region, the location of mining enterprises,

as well as the granulometric and mineral composition of technogenic inputs into the aquatic environment. A hypothesis has been put forward and developed on the dependence of the form of deposition of fine mineral particles in natural watercourses on the climatic features of the region. The method of integral assessment of the consequences of cumulative accumulation of mineral suspensions in the aquatic environment under various schemes of location of mining enterprises is substantiated and created for the first time. It is proved that the concentration of solid particles in suspensions increases in direct proportion to the decrease in the order of the watercourse in the general hierarchy of the river system.

Keywords: mining enterprises, technological aerosols, transit, deposition, natural ecosystems, structure, surface watercourses, climate, sedimentation, particles, environmental consequences.

Acknowledgment: The research was carried out within the framework of Event No. 1 of the Comprehensive Scientific and Technical Program of the Full Innovation Cycle, approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1144-r of May 11, 2022, and the agreement on the provision of grants from the federal budget in the form of subsidies in accordance with paragraph 4 of Article 78.1 of the Budget Code of the Russian Federation No. 075-15-2022-1185 of September 28, 2022.

For citation: Galchenko Yu.P. Ecological aspects of mineral dust deposition of mining enterprises in surface watercourses of natural ecosystems. Surveying and subsoil use. 2023;(6): 82-86. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2023_6_82_86.

В современную эпоху обострения противостояния Человека и Природы эволюционное развитие основных геосфер нашей планеты характеризуется усилением эффектов деградации их компонентов, связанных с возрастающим антропогенным давлением, как в форме преобразования природы человеком, так и в форме загрязнения природных экосистем различными поллютантами. Эти изменения сказываются практически на всех компонентах природных экосистем и существуют в различных временных масштабах, а потому требуют системного подхода к их изучению. Во многих регионах планеты повышенный уровень загрязнения атмосферы, почв, водоемов и т.д. привел к большим антропогенным нагрузкам на окружающую среду, с которым биосфера иногда справиться уже не в состоянии, что, в свою очередь, влияет на естественные циклы природных процессов и окружающую среду. Прежде всего, это относится к загрязнению естественной биоты Земли компонентами, находящимися в газовом и аэрозольном состояниях, выбросы которых в окружающую среду сопровождают практически все виды промышленного производства [1-2].

Взаимодействие горного производства с гидросферой Земли предусматривает активное использование её ресурсных, транзитных и депонирующих функций. В экологическом плане это взаимодействие распадается на две составляющих: минеральные взвеси сточных вод и тонкодисперсные частицы, осаждающиеся из атмосферы.

По составу пыль подразделяют на органическую, минеральную и смешанную. По размеру мелкодисперсные частицы разделяют на три основные группы [3]:

Крупнодисперсные (грубые) — частицы с размером от 10 до 100 мкм, заметные невооружённым глазом и оседающие в неподвижном воздухе с возрастающей скоростью;

Микроскопические — частицы с размером от 0,25 до 10 мкм. видимые в обычные оптические микроскопы и оседающие в воздухе с постоянной скоростью;

Субмикроскопические — частицы с размером менее 0,25 мкм, обнаруживаемые только при помощи электронных микроскопов, находящиеся в постоянном броуновском движении, практически не оседающие в неподвижном воздухе и энергично диффундирующие. Пыль такой крупности по своим свойствам приближается к молекулам газа.

Основным источником пыли, попадающей в водотоки через транзит атмосферы, являются буровзрывные работы.

Технологический цикл взрывного способа отбойки по времени на 80-85% состоит из буровых работ и на 15-20% — из взрывных. Однако по объёмам разрушаемого материала литосферы это соотношение меняется к обратную сторону и, в зависимости от применяемой геотехнологии, роль взрывной отбойки в образовании тонкодисперсных новообразований становится определяющей. Выполненный обзор работ последних лет показал, что пока основное внимание привлекают к себе проблемы газового загрязнения атмосферы и накопления в ней углекислого газа [4-9]. Поэтому изучение и оценка экологических последствий от насыщения водных систем тонкодисперсными твёрдыми компонентами в условиях быстрого количественного роста техносферы становится всё более актуальной научной проблемой.

Результаты исследований

Разработка месторождений твёрдых полезных ископаемых в зонах влияния водотоков высокого порядка неизбежно приводит к загрязнению тонкодисперсными минеральными частицами всех водотоков данной системы, включая и главную реку («ствол речной системы»). Общее количество твёрдых минеральных частиц в воде, при этом, интегрально возрастает по мере снижения порядка водотока в системе, а удельный показатель этой формы загрязнения изменяется обратно пропорционально дебиту принимающих водотоков.

Общий уровень загрязнения водотоков техногенными поллютантами формируется как в результате их поступления с площади земельного отвода горных предприятий. Выполненными гидрологическими наблюдениями [10] установлено, что в водотоках, воспринимающих воздействие добывающих предприятий концентрация тонкодисперсных минеральных частиц по сравнению с фоновыми значениями изменяется обратно пропорционально дебиту водотока. При этом, была раскрыта интересная закономерность:

$$2r_i = 0,04 \times \beta^{-0,04},$$

где r_i — средний радиус единичной частицы в потоке, β — концентрация (мг/дм³) твёрдых частиц в потоке.

Графическая интерпретация этой зависимости показывает, что если крупность частиц при фоновых их концентрациях колеблется в диапазоне 23-55 мкм, со средним значением 36 мкм, то в водных потоках загрязнённых техногенными тонкодисперсными минеральными частицами грануломет-

рический диапазон этих частиц резко смещается в меньшую сторону до значений 1-16 мкм. При этом, доля мелких частиц быстро повышается по мере роста концентрации минеральных поллютантов в потоке [10].

Если объекты имеют характерные размеры менее 0,2 мкм, их определяют как *коллоиды* (золи) [11].

Общие количественные показатели, характеризующие поступление пылевидных фракций, образующихся при взрывной отбойке, в экосистемы региона полностью определяется механизмами транзита этих частиц в атмосфере и параметрами зоны их депонирования в геонимической среде. В то же время форма перемещения выпавших минеральных частиц в гидросферу полностью определяется климатическими особенностями региона. В летний период техногенная пыль осаждается на листовых пластинках растений в фитоценозах экосистем, смыывается с них дождями и окончательно депонируется в педосфере. В природные водотоки поступает только та пыль, которая осела на их поверхности. В зимний же период весь объём поступающей в регион минеральной пыли депонируется на поверхности снегового покрова, а затем, вместе с талыми водами, полностью поступает в природные водотоки. Рассматривая дальнейшее поведение пылевидных частиц в водной среде, следует отметить, что эффект броуновского движения заметно проявляется только для частиц размером менее 0,5 мкм. Эти частицы достаточно равномерно распределяются во всём объёме дисперсии. Они практически не осаждаются и образуют устойчивые взвеси. Перемещение же более крупных частиц в природных водотоках подчиняется другим законам, для описания которых можно воспользоваться известными положениями физики сплошных сред [12-13] считая, что на твёрдую сферическую частицу, помещённую в жидкость действуют:

Сила тяжести (F_T)

$$F_T = \frac{4}{3} \times g \times \pi \times r_i^3 \times q_i. \quad (1)$$

Архимедова сила выталкивания (F_A)

$$F_A = \frac{4}{3} \times g \times \pi \times r_i^3 \times q_{жс}. \quad (2)$$

Гидравлическое сопротивление среды (R), вызванное падением частицы

$$R = 6 \times \pi \times \varphi_0 \times r_i \times b \times V_T \times C, \quad (3)$$

где φ_0 – характеристическая вязкость среды; b – весовая концентрация в ней твёрдой фазы; V_T – объём частицы; q_i и $q_{жс}$ – соответственно плотности частицы и жидкости; g – ускорение свободного падения; C – скорость осаждения частицы; r_i – радиус частицы.

Необходимо иметь в виду, что представленный выражением (3) закон Стокса применим только для частиц, имеющих малые скорости и радиусы.

Во всех остальных случаях движение частиц описывается выражением гидравлического сопротивления:

$$R = 6 \times \pi \times r_i \times C \times \varphi_0 \left(1 + \frac{3}{8} R_p\right),$$

где величина R_p – число Рейнольдса

$$(R_p = \frac{q_{жс} \times C \times r_i}{\varphi_0}).$$

Когда число Рейнольдса достаточно велико, то развивается турбулентность и гидравлическое сопротивление среды становится зависимым от квадрата скорости частицы [14]: $F_c \approx C^2$.

Соблюдая формальное условие баланса сил $F_m + F_A + R = 0$ можно найти в явном виде зависимость между скоростью осаждения частицы (C), её размером и характеристиками среды:

$$C = \frac{r_i^2 \times 0,22g \times (q_i - q_{жс})}{\varphi_0} = \text{const} \times \frac{r_i^2}{\varphi_0}. \quad (4)$$

При невысоких концентрациях взвешенных минеральных частиц характеристическая вязкость дисперсии с достаточной степенью точности соответствует динамической вязкости воды (*табл. 1*).

Как видно из выражения (4), уменьшение температуры водной среды способствует накоплению в ней всё более крупных частиц, а, следовательно, к изменению дисперсного состава взвесей, относящихся к тонкодисперсным фракциям, не только в зависимости от плотности геоматериала, но и от температуры, которая, в свою очередь, зависит от географического положения предприятия и сезонности ведения добычи.

В работе [16] было показано, что при малой концентрации твёрдого и снижении температуры с 20° до 0° скорость осаждения минеральных частиц снижается в $\sqrt{2}$ раз, что существенно влияет на перемещение частиц по горизонтали. Так как процесс насыщения водной среды пылевыми частицами протекает неравномерно, а гранулометрический и минеральный состав твёрдой фракции образующихся дисперсий варьируется в широких пределах, то для понимания закономерностей осаждения необходимо рассмотреть также и седиментацию отдельной частицы в условиях её стеснённого падения. В работе [13] была выведена формула для определения вязкости однородной дисперсии, представленной малыми частицами правильной формы с известной плотностью:

$$\varphi_0 = \frac{5q_i}{2} \times \left(\frac{4\pi \times r_i^2}{3}\right) = \text{const} \times q_i \times r_i^3. \quad (5)$$

Таблица 1 / Table 1

Зависимость динамической вязкости воды Ψ от температуры при нормальном давлении (по [15]) /
Dependence of the dynamic viscosity of water Ψ on temperature at normal pressure (according to [15])

Температура (°C) Temperature (°C)	0	4	6	8	10	2	4	6	8	0	2
$\Psi \cdot 10^3$ (Па·с)	1,721	1,567	1,473	1,386	1,308	1,237	1,172	1,112	1,057	1,005	0,960

Подставив (5) в (4) имеем:

$$C = \text{const} \times \frac{1}{r_i \times q_i}.$$

Из полученного выражения следует, что повышение концентрации твёрдого в дисперсии увеличивает её седиментационную устойчивость. Одновременно, фактор размера частиц обретает меньшую значимость. Это, в свою очередь, означает, что всё более грубые суспензии становятся седиментационно устойчивыми.

Так как процесс осаждения частиц происходит в дисперсной среде, то поправку, учитывающую «стеснённое падение» можно легко получить из известного уравнения Годэна [17]:

$$C_{cm} = C \times \frac{q_i - 6 \times (q_i + 0,91 q_{жс})}{q_i},$$

где C_{cm} — скорректированная скорость осаждения частиц.

Из анализа полученных уравнений следует, что со снижением температуры воды и с повышением концентрации в ней техногенных минеральных частиц их седиментационная устойчивость заметно повышается. Это означает, что при выпадении техногенной пыли горных предприятий из атмосферы на поверхность природных водотоков площадь вторичного депонирования минеральных частиц в донных отложениях (S_d) всегда будет повышать площадь выпадения пыли на поверхность водотока (S_n) на величину, пропорциональную его скорости течения (V_g) и глубине (H_g):

$$S_d = S_n \times (1 + V_g \times \frac{H_g}{C_{cm}}).$$

Выполненные количественные оценки [18-19] показывают, что по мере снижения температуры воды, одновременно с увеличением содержания взвесей в ней, возрастает седиментационная устойчивость частиц. Было установлено, что увеличение концентрации твёрдого до 2,5 г/л приводит к тому, что частицы размером ~80 мкм осаждаются со скоростью, характерной для 5-ти микронных частиц, а при температуре близкой к 0°C — седиментационно устойчивыми становятся не только коллоиды, но также более крупные частицы с размерами до 110 мкм. Это способствует увеличению длины их транзита в водной среде, а, следовательно, и к загрязнению всех последующих водотоков речной системы, снижению светового потока проникающего в водную среду, что приводит к угнетению альгофлоры, к заиливанию русловых отложений, существенно нарушающему условия развития зообентоса в олиготрофных водоёмах.

Заключение

Тонкодисперсные взвеси, образующиеся в результате пылевого загрязнения поверхности природных водотоков, существенно изменяют их экологическое состояние, снижая прозрачность вод, их химический состав и структуру донных отложений. Подвижность этих техногенных новообразований определяется не только их размерами и плотностью, но и климатическими особенностями региона.

В зимний период, когда температура приближается к 0°C седиментационно устойчивыми становятся не только коллоиды, но и более крупные частицы с размером до 100-110 мкм. Это, в свою очередь, увеличивает длину их транзита, порождая кумулятивный экологический эффект при загрязнении минеральными частицами водотоков более низких порядков. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Геоэкология освоения недр Земли и экогетехнологии разработки месторождений. М.: Научтехлитиздат, 2015. 360 с.
2. Семячков А.И., Дребенштетт К., Воробьев А.Е. Геоэкология. Екатеринбург: УГТУ, 2014. 289 с.
3. Сытенков В.Н. Управление пылегазовым режимом глубоких карьеров. М.: Геоинформцентр, 2003. 288 с.
4. Михайлов В. Г. Обзор современных направлений обеспечения экологической безопасности // Техника и технология горного дела. 2023. № 1. С. 71-97.
5. Ayaz A., Krisada C., Furqan F., Waqas A., Suniti S., Fahid A. Compressive strength prediction via gene expression programming (GEP) and artificial neural network (ANN) for concrete containing RCA // Buildings. 2021. V. 11 (8). № 324. P. 1-18.
6. Armaghani D. J., Panagiotic G. A. Comparative study of ANN and ANFIS models for the prediction of cement-based mortar materials compressive strength // Neural Computing and Applications. 2021. № 33 (1). P. 4501-4532.
7. Smerigan A., Uludag-Demirer S., Cutshaw A., Annaliese M., Wei Liao. High-efficiency carbon dioxide capture using an algal amino acidsalt solution // Journal of CO2 Utilization. 2023. № 69 (9). P. 1-9.
8. Технологический обзор — улавливание, использование и хранение углерода (CCUS). Unece. 02.2021. 36 с. URL: <https://unece.org/publications/tekhnologicheskii-obzorulavlivanie-ispolzovanie-i-khranenie-ugleroda-ccus>
9. Максимов А.Л. Стратегия декарбонизации нефтегазовой и химической отраслей // Материалы конференции «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса», 2021. 41 с.
10. Даувальтер В.А., Даувальтер М.В. Геоэкологическая оценка состояния природных вод в зоне влияния комбината «Североникель». Мурманск: МГТУ, 2014. 216 с.
11. Канафонов Б.С. Биологическая очистка сточных вод. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2023. 255 с.
12. Исихара А. Статистическая физика. М.: Мир, 1973. 472 с.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 т. Т. VI Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
14. Хуанг К. Статистическая механика. М.: Мир, 1966. 520 с.
15. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. Киев: Наукова думка, 1986. 558 с.
16. Никулин И. И. Экспресс-приёмы выделения тонкодисперсных минералов из цемента осадочных пород // Вестник ВГУ, Геология. Воронеж. 2010. № 1. С. 286-292.

17. Годэн А.М. Основы обогащения полезных ископаемых. М.: Металлургиздат, 1946. 250 с.
18. Banat F.A., Al-Asheh S. Biosorption of phenol by chicken feathers // Environmental Engineering and Policy. 2000. № 2. P. 85-90.
19. Галченко Ю. П., Лебухов В. Г. Процессы техногенного изменения водных сообществ в зоне влияния предприятий россыпной металлодобычи // Экологические системы и приборы. 2015. № 2. С. 21-28.

REFERENCES

1. Trubeckoj K.N., Galchenko YU.P. Geoecology of the development of the Earth's interior and geotechnologies of field development. Moscow, Nauchtekhizdat, 2015, 360 p.
2. Semyachkov A.I., Drebenshtedt K., Vorob'yov A.E. Geoecology. Yekaterinburg, USTU, 2014, 289 p.
3. Sytenkov V.N. Management of the dust and gas regime of deep quarries. Moscow, Geoinformcenter, 2003, 288 p.
4. Mikhailov V. G. Review of modern trends in ensuring environmental safety. Technique and technology of mining. 2023, no. 1, pp. 71-97. (In Russ.).
5. Ayaz A., Krisada C., Furqan F., Waqas A., Suniti S., Fahid A. Compressive strength prediction via gene expression programming (GEP) and artificial neural network (ANN) for concrete containing RCA. Buildings. 2021, v. 11 (8), no. 324, pp. 1-18.
6. Armaghani D. J., Panagiotic G. A. Comparative study of ANN and ANFIS models for the prediction of cement-based mortar materials compressive strength. Neural Computing and Applications. 2021, no. 33 (1), pp. 4501-4532.
7. Smerigan A., Uludag-Demirer S., Cutshaw A., Annaliese M., Wei Liao. High-efficiency carbon dioxide capture using an algal amino acidsalt solution. Journal of CO2 Utilization. 2023, no. 69 (9), pp. 1-9.
8. Technological Overview – Carbon capture, Use and Storage (CCUS). Unece. 02.2021. 36 p. URL: <https://unece.org/publications/tekhnologicheskiiy-obzorulavlianie-ispolzovanie-i-khranenie-ugleroda-ccus>
9. Maksimov A.L. Decarbonization strategy of oil and gas and chemical industries. Materials of the conference «Actual tasks of the petrochemical complex», 2021]. 2021, 41 p. (In Russ.).
10. Dauval'ter V. A., Dauval'ter M.V. Geoecological assessment of the state of natural waters in the zone of influence of the Severonikel Plant. Murmansk, MSTU, 2014, 216 p.
11. Kanafontov B.S. Biological wastewater treatment. Moscow, SIC INFRA-M, 2023, 255 p.
12. Ishihara A. Statistical physics. Moscow, Mir, 1973, 472 p.
13. Landau L.D., Lifshic E.M. Theoretical physics: textbook in 10 vols. Vol. VI Hydrodynamics. Moscow, Nauka, 1988, 736 p.
14. Huang K. Statistical mechanics. Moscow, Mir, 1966, 520 p.
15. Dubrovskij I.M., Egorov B.V., Ryaboshapka K.P. Handbook of Physics. Kiev, Naukova dumka, 1986, 558 p.
16. Nikulin I. I. Express-methods of separation of fine minerals from cement of sedimentary rocks. Vestnik VSU, Geology. Voronezh. 2010, no. 1, pp. 286-292. (In Russ.).
17. Goden A.M. Fundamentals of mineral processing. Moscow, Metallurgizdat, 1946, 250 p.
18. Banat F.A., Al-Asheh S. Biosorption of phenol by chicken feathers. Environmental Engineering and Policy. 2000, no. 2, pp. 85-90.
19. Galchenko Yu. P., Lebukhov V. G. Processes of technogenic change of water communities in the zone of influence of placer metal mining enterprises. Ecological systems and devices. 2015, no. 2, pp. 21-28. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галченко Юрий Павлович:

доктор технических наук,
профессор,
член-корреспондент Российской Экологической Академии,
Главный научный сотрудник отдела горной экологии,
ИПКОН РАН,
г. Москва, Россия,
e-mail: sschtrek33@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galchenko Yury Pavlovich:

Doctor of Tech. Sciences,
Professor,
Chief Researcher of the Department of Mountain Ecology,
IICEM RAS
Moscow, Russia,
e-mail: schtrek33@mail.ru

Журнал включен в перечень ВАК по специальностям:

- 1.6.21. Геоэкология (технические науки),
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромышленная геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки),
- 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки),
- 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки),
- 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем (технические науки),
- 2.8.8. Геотехнология, горные машины (технические науки),
- 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых (технические науки).