

УДК 504.53:332.368

**ВЛИЯНИЕ СЖИГАНИЯ ПОПУТНОГО ГАЗА НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ
В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ****¹Яковенко А.А., ^{1,2}Котова Е.И.**¹ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,
Архангельск, e-mail: yakovenko.a.a@edu.narfu.ru;²ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», Москва, e-mail: ecopp@yandex.ru

В арктических условиях при эксплуатации объектов инфраструктуры нефтяных месторождений используются факельные установки различных типов для сжигания попутных газов. При использовании данной технологии в наибольшей степени техногенному воздействию подвергается верхняя часть геологической среды, особенно почвы. При сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках выделяются вредные для окружающей среды газы и вещества, в том числе тяжелые металлы, которые осаждаются на подстилающую поверхность, нарушая экологический баланс. В данной статье отражены результаты исследования распространения нефтяных углеводородов, свинца, алюминия, никеля и цинка, выделяющихся при сжигании попутного газа, и их влияния на почвы территории Ардалинского нефтяного месторождения Ненецкого автономного округа, а также выявленные закономерности в процессах загрязнения. Исследования проводились путем статистической обработки данных лабораторных анализов проб почвы, полученных в рамках комплексного экологического мониторинга. В работе представлены выявленные зависимости накопления в почве по времени нефтяных углеводородов и тяжелых металлов, а также концентрации загрязняющих веществ в зависимости от расстояния от факельной установки. Проведена оценка влияния ветра на распространение загрязнителей с составлением розы ветров и построены интерполяционные схемы для анализа пространственной ситуации. В результате исследования установлено, что в непосредственной близости от факельной установки концентрация нефтяных углеводородов наиболее максимальна, а распространение тяжелых металлов имеет обратную зависимость. Также доказано отсутствие влияния ветра как ключевого фактора на ореол распространения веществ загрязнителей.

Ключевые слова: попутный газ, факельная установка, почвы, мониторинг, нефтяные углеводороды, тяжелые металлы

**EFFECT OF ASSOCIATED GAS COMBUSTION ON SOIL POLLUTION
IN THE ARCTIC OIL FIELD****¹Yakovenko A.A., ^{1,2}Kotova E.I.**¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Arkhangelsk, e-mail: yakovenko.a.a@edu.narfu.ru;²Institute of Oceanology RAS named after P.P. Shirshov, Moscow, e-mail: ecopp@yandex.ru

Flare units of various types are used to burn associated gases in arctic conditions during the operation of infrastructure facilities of oil fields. The upper part of the geological environment, especially the soil, is exposed to the greatest anthropogenic impact when using this technology. When associated petroleum gas is flared in flares, gases and harmful to the environment substances are emitted, including heavy metals, which are deposited on the ground, disrupting the ecological balance. This article reflects the results of the study of the distribution of petroleum hydrocarbons, lead, aluminum, nickel and zinc, released during the combustion of associated gas, and their impact on the soils of the adjacent territories of the Ardalinsky oil field in the Nenets Autonomous Okrug, as well as identifying patterns in pollution processes. The study was carried out by statistical processing of laboratory data by analyzing soil samples of complex environmental monitoring. The paper presents the revealed dependences of the accumulation of oil hydrocarbons and heavy metals in the soil over time, as well as the concentration of pollutants depending on the distance from the flare unit. An assessment of wind effect on the spread of pollutants was carried out with the compilation of a wind rose and interpolation schemes were built to analyze the spatial situation. As a result of the study, it was found that in the immediate vicinity of the flare unit, the concentration of petroleum hydrocarbons is the highest, and the spread of heavy metals has an inverse relationship. The absence of the influence of wind as a key factor on the halo of the spread of pollutants has also been proven.

Keywords: associated gas, flare installation, soils, monitoring, petroleum hydrocarbons, heavy metals

Запасы углеводородов в Арктике колоссальны и составляют 412,2 млрд баррелей нефтяного эквивалента, или 22% мировых технически извлекаемых ресурсов нефти и газа [1].

Попутный газ представляет собой смесь различных газообразных углеводородов, растворенных в нефти. При добыче нефть поднимают на поверхность, где давление ниже пластового, и газ выделяется из неф-

ти – происходит процесс дегазации. Этот процесс могут также создавать искусственно при первичной переработке нефти путем сепарирования прямо на месторождении. Данная процедура применяется для повышения качества и транспортных свойств нефти. Часть извлекаемого попутного нефтяного газа (ПНГ) обычно используется для нужд энергетического обеспечения нефтепромысла, остальная часть сжигается

на факелах высокого давления (ФВД), факелах низкого давления (ФНД) и горизонтальной факельной установке (ГФУ).

Суточный объем добываемого флюида на Ардалинском месторождении составляет около 15,0 тыс. м³. Объем попутного нефтяного газа, извлекаемого за сутки, составляет около 150,0 тыс. м³. Часть попутного газа, в объеме 87,0 тыс. м³, тратится при выработке электроэнергии на нужды месторождения и подогрев нефти в печах, при первичной очистке. Оставшиеся 63,0 тыс. м³ утилизируют на факельной установке закрытого типа [2].

Попутный газ состоит из смеси метана, этана, пропана, бутана, изобутана и других углеводородов, а также содержит Ar, H₂, He, N₂, H₂S, CO, CO₂, различные серосодержащие соединения, инертные газы, а также водяные пары [3]. При сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках выделяются вредные для окружающей среды газы и вещества, в том числе и тяжелые металлы, которые осаждаются на поверхность прилегающей территории, оказывая негативное воздействие на экосистемы и здоровье персонала [4].

Изучение экологического состояния почв является одной из наиболее актуальных проблем геоэкологии. Загрязнение почв может быть вызвано как природными (атмосферными осадками [5; 6]), так и техногенными воздействиями. Техногенное загрязнение, в свою очередь, может быть механическим и химическим. Химическое воздействие связано с поступлением тяжелых металлов [7; 8], кислот, пестицидов, нефти и нефтепродуктов, щелочей и канцерогенных углеводородов, деятельностью металлообрабатывающих заводов. Такое загрязнение характерно для территорий под складами горюче-смазочных материалов, трубопроводных зон, придомовых территорий, полигонов, а также околофакельных зон. Загрязнение почвы влияет на показатели продуктивности сельского хозяйства и общую устойчивость экосистем [9].

Основными источниками, влияющими на содержание тяжелых металлов в почвах, являются два наиболее значимых природных фактора (поступление металлов в атмосферу при извержении вулканов, природных пожарах, выветривании горных пород и т.п.; поступление металлов из минеральных пород при почвообразовательном процессе) и как минимум пять антропогенных (отходы металлообработки, промышленные выбросы продуктов сгорания ископаемо-

го топлива, выбросы автомобильных отработанных газов и жидкостей, средства химизации сельского хозяйства и др.) [10]. Для заданной территории наиболее характерным источником загрязнения тяжелыми металлами является сжигание ископаемого топлива (попутного нефтяного газа), получаемого в процессе добычи нефти.

Рассмотренная литература свидетельствует о том, что на химический состав почв оказывает влияние почти любая деятельность человека, связанная с природными ресурсами. Отсутствие литературы, связанной непосредственно с загрязнением почв сжиганием попутного нефтяного газа на факельных установках, указывает на необходимость проведения исследований по этой теме.

Целью исследования является оценка распространения загрязняющих веществ, выделяющихся при сжигании попутного газа, и их влияния на почвы прилегающих территорий в условиях Арктики.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных используются материалы комплексного экологического мониторинга Ардалинского нефтяного месторождения, расположенного в Ненецком автономном округе в 60 километрах к северо-западу от поселка Хорей-Вер.

Материалы мониторинга включают данные лабораторных исследований проб почв с 22 точек замеров. Пробы отбирались с 1999 по 2005 г., раз в год в летний период.

Интервал отбора почв составлял от 0,1 до 0,3 м от поверхности. Схема расположения точек отбора проб, сопоставленная с построенной розой ветров, представлена на рис. 1.

Для проведения комплексного экологического мониторинга в указанных точках использовалось специальное оборудование и соответствующие методики. Для определения тяжелых металлов в почвах и почвенных компонентах применялся атомно-абсорбционный метод анализа почв и вытяжек с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией «МГА-915М». Обработка показаний производилась в соответствии с «Методическими указаниями по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства» (издание 2-е, переработанное и дополненное) и ГОСТ Р 56157-2014 «Почва. Методики (методы) анализа состава и свойств проб почв. Общие требования к разработке».

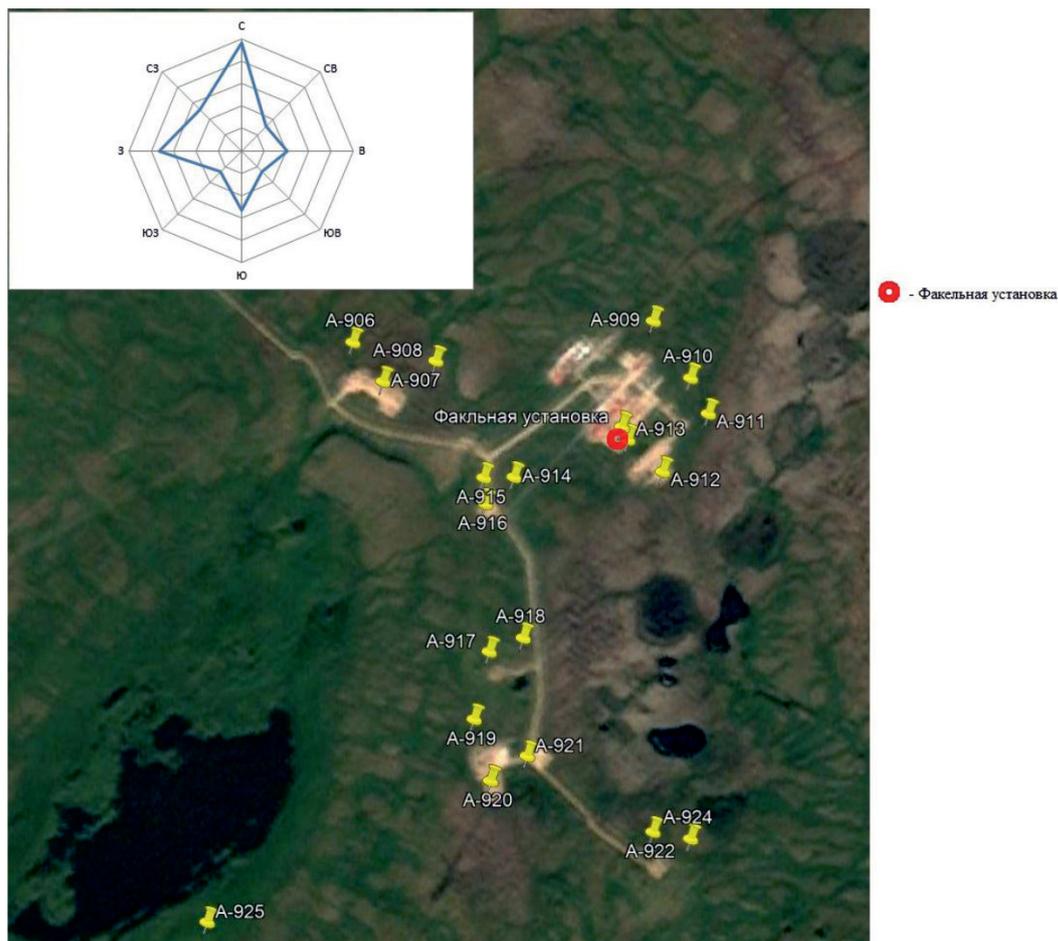


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб

Для анализа почв на содержание углеводородов был использован анализатор содержания нефтепродуктов АН-2. Испытания проводились в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии». Статистическая обработка данных проводилась в программном комплексе Microsoft Office Excel 2016.

Результаты исследования и их обсуждение

В рамках исследования проведена оценка концентраций веществ в почвах в зависимости от расстояния и оценка воздействия ветра на распространение веществ загрязнителей.

Проведена статистическая обработка данных лабораторных исследований содержания в почвах нефтяных углеводородов

и тяжелых металлов: свинца, алюминия, никеля, цинка, с учетом расстояния от факела. Полученные результаты представлены в таблице.

Согласно полученным данным, отмечается снижение средних значений содержания нефтяных углеводородов с 1619 до 78 мг/кг с увеличением расстояния от факельной установки. Максимальная концентрация нефтяных углеводородов в почве отмечена на расстоянии до 500 метров – 4133 мг/кг, наименьшая – 13 мг/кг на расстоянии более 3000 метров. Значения медианы вблизи факельной установки примерно соответствуют среднему значению ряда. На расстоянии более 3000 м уровень медианы значительно ниже среднего значения, что наряду с высокими цифрами стандартного отклонения может свидетельствовать о большом разбросе данных.

Для тяжелых металлов (Pb, Al, Ni, Zn) средняя величина содержания в почвах увеличивается с увеличением расстояния.

Содержание нефтяных углеводородов (НУ) и тяжелых металлов в пробах почв, мг/кг

Расстояние от факела, м	НУ	Pb	Al	Ni	Zn
до 500	$\frac{150-4133}{1619 \pm 1328 (1022)}$	$\frac{6-28}{11 \pm 8 (8)}$	$\frac{4954-20858}{10955 \pm 5258 (10578)}$	$\frac{9-22}{13 \pm 5 (13)}$	$\frac{11-27}{21 \pm 6 (21)}$
500–1000	$\frac{188-1453}{835 \pm 390 (808)}$	$\frac{5-6}{6 \pm 0 (6)}$	$\frac{1850-6544}{4110 \pm 1552 (4044)}$	$\frac{8-11}{9 \pm 1 (9)}$	$\frac{11-18}{15 \pm 3 (15)}$
1000–1500	$\frac{377-1251}{794 \pm 324 (797)}$	$\frac{6-12}{9 \pm 2 (9)}$	$\frac{16115-28152}{20575 \pm 3767 (19432)}$	$\frac{18-25}{21 \pm 3 (22)}$	$\frac{22-82}{37 \pm 21 (30)}$
1500–3000	$\frac{157-1345}{806 \pm 406 (728)}$	$\frac{6-9}{8 \pm 1 (8)}$	$\frac{14111-24766}{18765 \pm 4004 (17712)}$	$\frac{15-32}{21 \pm 6 (19)}$	$\frac{16-35}{23 \pm 6 (22)}$
3000–7000	$\frac{13-720}{182 \pm 275 (29)}$	$\frac{10-20}{14 \pm 3 (13)}$	$\frac{33480-63180}{53906 \pm 10362 (56120)}$	$\frac{28-52}{43 \pm 8 (43)}$	$\frac{38-70}{57 \pm 12 (60)}$
7000 и более	$\frac{13-212}{78 \pm 77 (43)}$	$\frac{9-16}{13 \pm 3 (13)}$	$\frac{44540-71280}{59203 \pm 9113 (59120)}$	$\frac{35-50}{42 \pm 6 (41)}$	$\frac{65-109}{81 \pm 15 (80)}$

В числителе: минимальное – максимальное значение, в знаменателе: среднее арифметическое значение \pm стандартное отклонение (медиана)

Таким образом, наблюдается рассеивание металлов на расстояния от 3 км и более. Минимальные значения для металлов определены на расстоянии 500–1000 м. Максимальные значения для Al и Zn получены на расстоянии 7000 м и более, для Ni – в интервале 3000–7000 м. Стандартное отклонение выборки свидетельствует о незначительном разбросе значений. Размер медианы примерно соответствует среднему значению ряда. Среднее значение содержания свинца в почве увеличивается с 11 до 13 мг/кг, алюминия – с 10955 до 59023 мг/кг, никеля – с 13 до 42 мг/кг, цинка – с 21 до 81 мг/кг. При этом отмечены пониженные концентрации металлов в почве в радиусе 500–1000 м.

Получившиеся результаты можно объяснить особенностями процессов переноса и осаждения частиц, переносящих данные вещества. Тяжелые металлы чаще всего переносятся на частицах субмикронного размера, что способствует их переносу на большие расстояния.

Следующим этапом работы была оценка влияния ветра на распространение загрязнения.

Для построения наиболее соответствующей Ардалинскому месторождению розы ветров были взяты метеорологические данные по направлению ветра в теплый период

года по ближайшей метеостанции Хоседа-Хард за 1999–2005 гг.

В результате построения розы ветров можно наблюдать преобладание ветров северной составляющей (рис. 2).

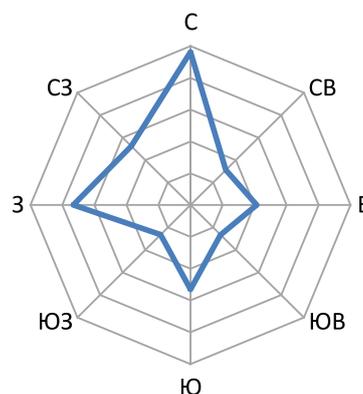


Рис. 2. Роза ветров для теплого периода года на метеостанции Хоседа-Хард

Для анализа пространственной ситуации были построены интерполяционные цветовые схемы с усредненными за весь рассматриваемый промежуток времени концентрациями.

Схема распространения нефтяных углеводородов представлена на рис. 3.

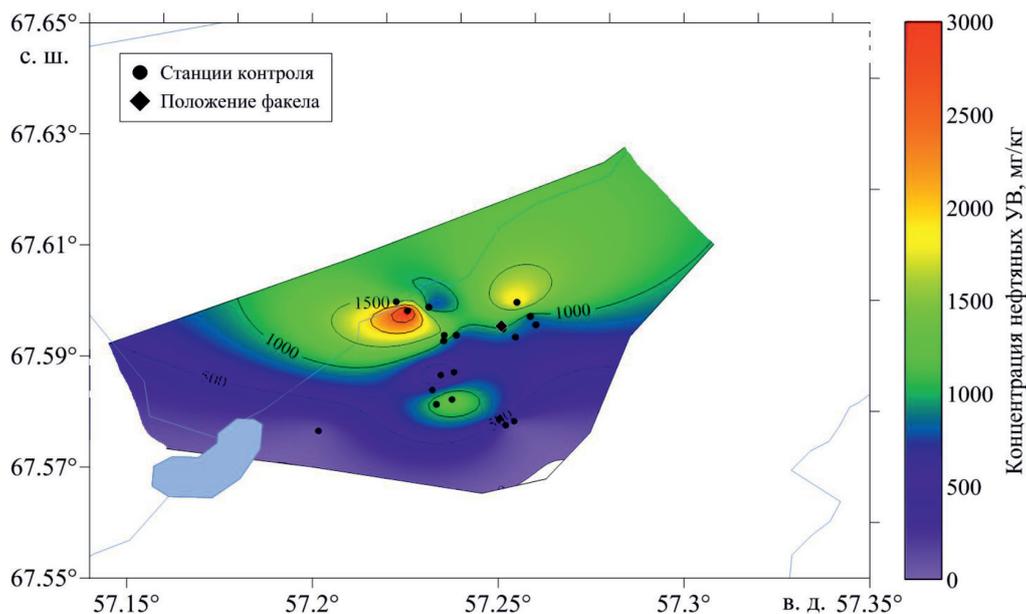


Рис. 3. Схема распространения нефтяных углеводородов

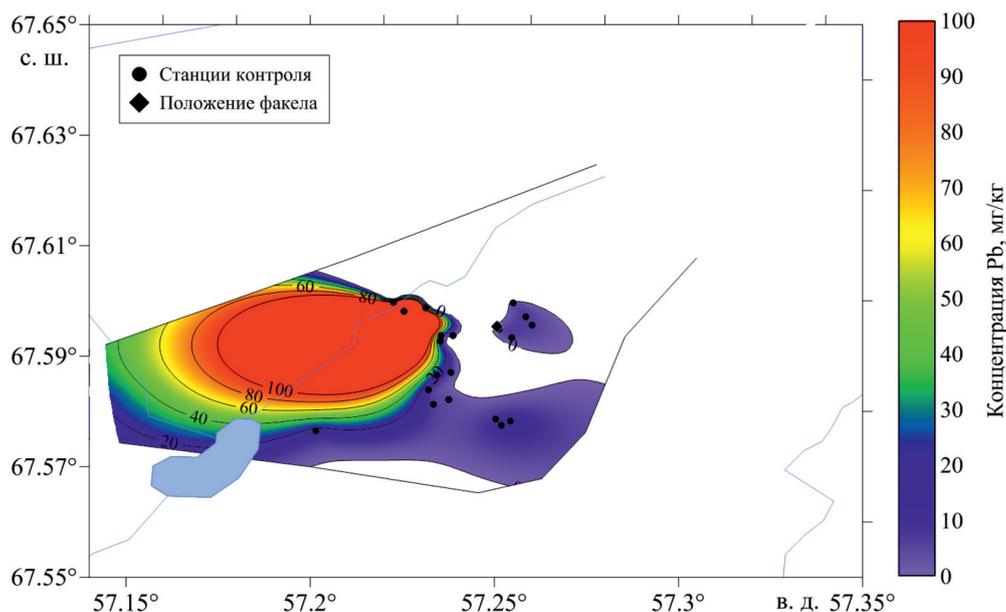


Рис. 4. Схема распространения Pb

Исходя из анализа схемы распространения нефтяных углеводородов, можно отметить повышенные концентрации к северу от установки. Выделяется загрязненный участок к западу от факела, вероятно, связанный с локальным источником загрязнения (стоянка автотранспорта). Влияние ветра проследить сложно. Схема распространения свинца представлена на рис. 4.

На интерполяционной картине распространения Pb видно смещение ореола распространения загрязнителя в западном направлении. Данный факт показывает, что ветер не оказывает влияния на разнос Pb от факельной установки. Возможно, это связано с локальными циркуляциями воздуха. Схема распространения цинка представлена на рис. 5.

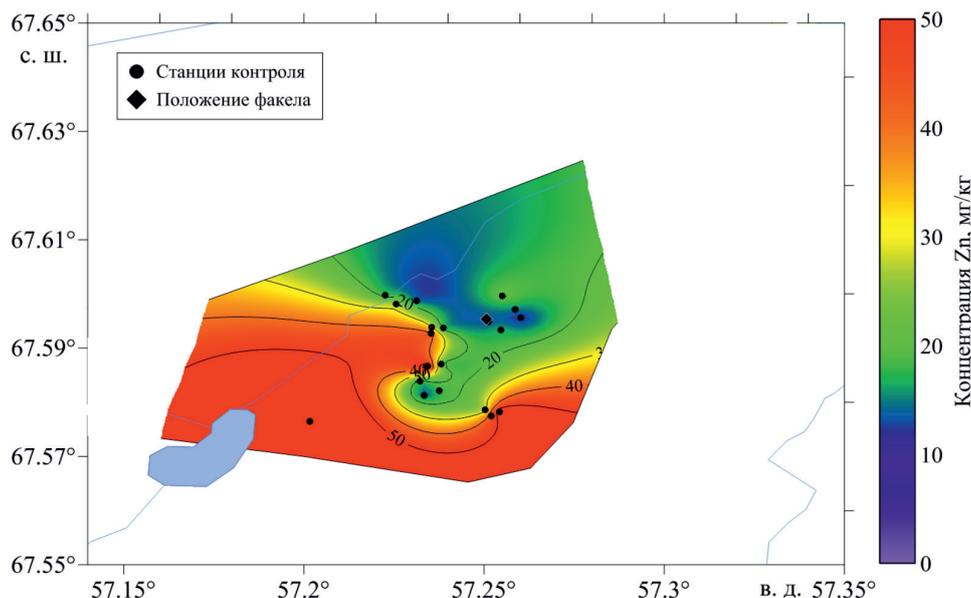


Рис. 5. Схема распространения Zn

Как видно на рис. 5, концентрации цинка в почве увеличиваются при удалении от факела, при этом перенос осуществляется в южном и юго-западном направлении. Этот факт согласуется с преобладанием южного направления ветра.

Заключение

Исходя из проведенных исследований были получены следующие зависимости: в непосредственной близости от факельной установки концентрация нефтяных углеводородов максимальна. Распространение тяжелых металлов осуществляется на расстоянии от 3000 м. Было показано отсутствие влияния ветра как ключевого фактора на ореол распространения загрязнителей. Предполагается влияние локального ветрового потока на данной территории.

В дальнейшем планируется детальное изучение причин возникновения данных зависимостей и выявление факторов распространения загрязнителей. Полученные материалы будут использованы для обоснования необходимости модернизации оголовков факельных установок.

Список литературы / References

1. Медведев Н.В. Нефтедобыча в Арктике // *Neftegaz*. RU. 2015. № 7–8. С. 52–55.
2. Medvedev N.V. Oil production in the Arctic. The *Neftegaz*. RU. 2015. №7–8. P. 52–55 (in Russian).
3. Макаровский Н.А. Обоснование методов защиты верхней части геологической среды на основе локального мониторинга при эксплуатации нефтяных месторождений на крайнем севере (на примере Ардалинского нефтегазодобывающего комплекса): автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. Архангельск, 2010. 25 с.

Makarsky N.A. Substantiation of methods for protecting the upper part of the geological environment based on local monitoring during the operation of oil fields in the far north (on the example of the Ardalinsky oil and gas production complex): avtoref. dis. ... kand. g.-m. nauk. Arkhangel'sk, 2010. 25 p. (in Russian).

3. Ботнева Т.А., Панкина Р.Г., Соколов В.А. Геохимия нефтяных попутных газов (по материалам Волго-Уральской области, Кавказа и Южно-Украинской области). М.: Недра, 1966. 202 с.

Botneva T.A., Pankina R.G., Sokolov V. A. Geochemistry of petroleum associated gases (based on the materials of the Volga-Ural region, the Caucasus and the South Ukrainian region). M.: Nedra, 1966. 202 p. (in Russian).

4. Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б. Экологический мониторинг нефтегазодобывающих объектов Европейского Севера России: учебное пособие. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. 234 с.

Gubaidullin M.G., Korobov V.B. Environmental monitoring of oil and gas production facilities in the European North of Russia: training manual. Arkhangel'sk: IPTS SAFU, 2012. 234 p. (in Russian).

5. Eludoyin A. Precipitation–soil water chemistry relationship: case study of an intensively managed grassland ecosystem in southwest England. *Applied Water Science*. 2020. Vol. 10. No. 125.

6. Kotova E.I., Kuznetsova I.A., Kryauchynas V.V., Iglovsky S.A., Larionov N.S. (2019) Contribution of the atmospheric channel to lead contamination of soils in the Arctic territories. *Arctic Environmental Research*. 2019. No. 19 (2). P. 56–64. DOI: 10.3897/issn2541-8416.2019.19.2.56.

7. Petrovic J.V., Alagic S.C., Milic S.M., Tosic S.B., Bugarin, M.M. Chemometric characterization of heavy metals in soils and shoots of the two pioneer species sampled near the polluted water bodies in the close vicinity of the copper mining and metallurgical complex in Bor (Serbia): Phytoextraction and biomonitoring contexts. *Chemosphere*. 2021. Vol. 262. No. P. 127808.

8. Vithanage M., Rajapaksha A.U., Oze Ch., Rajakaruna N., Dissanayake C.B. Metal release from serpentine soils in Sri Lanka. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. Vol. 186. No. 6. P. 3415–3429.

9. Kicinska A., Wikar J. Ecological risk associated with agricultural production in soils contaminated by the activities of the metal ore mining and processing industry – example from southern Poland. *Soil & Tillage research*. 2021. Vol. 205. No. P. 104817.

10. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах (монография). Саратов: Ракурс, 2017. 178 с.

Medvedev I.F., Derevyagin S.S. Heavy metals in ecosystems (monograph). Saratov: Rakurs, 2017. 178 p. (in Russian).