

Географо-экологическое районирование трассы нефтепровода по степени опасности воздействия на окружающую среду при аварийных разливах нефти в Арктике

© 2020. А. С. Лохов^{1,2}, м. н. с.,

М. Г. Губайдуллин², д. г.-м. н, профессор, зав. кафедрой,

В. Б. Коробов¹, д. г. н., в. н. с.,

А. Г. Тутыгин³, к. ф.-м. н., доцент, зав. лабораторией,

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,

117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36,

²Северный Арктический федеральный университет им. М. В. Ломоносова,

163002, Россия, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 14,

³Федеральный исследовательский центр комплексного изучения

Арктики имени академика Н. П. Лаверова РАН,

163000, Россия, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 23,

e-mail: szoiras@yandex.ru, m.gubaidulin@narfu.ru, andgt64@yandex.ru

Уровень воздействия на окружающую среду в Арктике при аварийных разливах нефти отличается даже на относительно небольших участках, в силу значительной неоднородности влияющих на распространение нефти факторов. В статье рассмотрены наиболее значимые из них: поглощающая способность грунтов, обводненность территории и уклон земной поверхности. Для оценки опасности воздействия предложена модель балльных классификаций, основанная на сумме произведений показателей факторов на их весовые коэффициенты. Оценка растекания нефти выполнена по разработанной одним из авторов гидродинамической модели, количество водных объектов получено при помощи космоснимков, уклоны поверхности – при помощи карты высот. Расчёты выполнены для трассы трубопровода «Южное Хыльчую – Варандей» в Ненецком автономном округе. Установлено, что уровень потенциального воздействия существенно различается вдоль трассы в зависимости от степени влияния факторов. Предложена вербально-числовая шкала для оценки степени воздействия и на её основе проведено районирование трассы.

Ключевые слова: разливы нефти, нефтепровод, районирование, Арктика, экспертные методы.

Geographical and ecological land zoning of onshore oil pipeline location by level of hazard to environment from emergency oil spills in Arctic region

© 2020. A. S. Lokhov^{1,2}, M. G. Gubaidullin²

V. B. Korobov¹, A. G. Tutygin³

¹Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,

36, Nahimovskiy Prospekt, Moscow, Russia, 117997,

²Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov,

17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, Russia, 163002,

³The Federal Center for Integrated Arctic Research

of the Russian Academy of Sciences,

23, Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, Russia, 163000,

e-mail: szoiras@yandex.ru, m.gubaidulin@narfu.ru, andgt64@yandex.ru

The level of environmental impact from emergency oil spills in the Arctic region is wide variety even for small areas due to considerable heterogeneity of factors affecting the fate of spilled oil. Authors suggest a point rating classification model for assessment the hazard level of oil spills by means of the sum of products of the factor indicators and their weight coefficients. This paper investigates next factors: oil spreading assessment; number of water bodies that can be polluted; surface slope. Calculations performed for “Yuzhnoye Khylichuyu – Varandey” pipeline in the Nenets Autonomous Okrug, Russian Federation. Oil spreading assessment is calculated with hydrodynamic model considering type of soil (in this case – various types of peat), soil permeability, soil humidity, oil viscosity, evaporation of oil and others. Number of

water bodies is calculated by means of Earth satellite images, surface slope – by means of topographic map. The number of water bodies along this pipeline is 59, including 39 lakes and 20 rivers. Average surface slope for pipeline is low (1%), this is not so significant for hazard level assessment. Authors determined that level of potential risk to the environment is significantly different depending on factor influence. Paper suggests five-step verbal-numeric rating scale for assessment the hazard level, and pipeline zoning has been carried out on this basis.

Keywords: oil pipeline, onshore oil spills, zoning, Arctic region.

Как показывает практика, безаварийная эксплуатация нефтепроводов невозможна. Так, по данным Минэнерго России [1] на промысловых нефтепроводах и нефтепродуктопроводах Российской Федерации (РФ) в 2017 г. произошло 9472 случаев прорывов, в 2016 г. – 9599, в 2015 г. – 10544. Недобор нефти по этой причине составил 58; 125,4; 68 тыс. т соответственно. Основной причиной аварий в 91–92% случаев стала коррозия нефтепроводов.

По данным Минприроды [2] в 2017 г. на магистральных нефтепроводах произошла 1 чрезвычайная ситуация (ЧС) локального характера (разлив до 100 т нефти/нефтепродуктов), в 2016 г. – 5. Необходимо отметить, что нижняя граница ЧС локального масштаба может существенно отличаться, для разливов из нефтепроводов на промышленные площадки с твёрдым покрытием она составляет 30 т для лёгких нефтепродуктов и 40 т – для нефти, тогда как для разливов в водоохранной зоне она равняется нулю.

В 2017 г. общая протяжённость магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов на территории РФ составила – 76,47 тыс. км, в 2016 г. – 76,6 тыс. км [2]. Несмотря на незначительное уменьшение в 2017 г., существуют тенденции к росту общей протяжённости нефтепроводов как в России, так и в других странах [3–5]. Суммарная протяжённость нефтепроводов и увеличение срока их эксплуатации обуславливают повышение вероятности возникновения аварий на данном типе объектов.

Географо-экологическое районирование по степени потенциального воздействия на природную среду необходимо, в первую очередь, для более эффективного разворачивания средств реагирования на аварийные разливы нефти, так как при возможности прогнозирования последствий аварии и выделения наиболее опасных участков можно эффективнее решать задачи логистики, например, выбор месторасположения средств реагирования различного типа в планах по ликвидации аварийных разливов нефти.

Различные методики оценки рисков и опасности для наземных нефтепроводов в настоящее время востребованы по всему миру

как для конкретных нефтепроводов [6–9], так и универсальные [10–11]. Особенно актуальной эта задача становится в случае с Арктической зоной, так как арктические экосистемы являются более хрупкими и подверженными опасности разрушения вследствие загрязнения нефтью и нефтепродуктами [12, 13].

Целью данной работы является выявление зон наиболее подверженных нефтяному загрязнению при помощи синтеза экспертных методов и гидродинамической модели разливов нефти на поверхности суши, а также районирование на её основе трассы нефтепровода «Южное Хыльчюю – Варандей», расположенного в Ненецком автономном округе.

Методы исследований

Для решения задачи районирования трассы нефтепровода по степени опасности, вследствие аварийного разлива нефти, можно воспользоваться экспертными методами. В современной географии данная методика часто используется. Основная идея метода заключается в определении факторов и их значимости, в данном случае – по степени опасности. Тогда интегральным показателем степени опасности аварийных разливов может быть принята сумма произведений показателей факторов на их весовые коэффициенты:

$$a_j = \sum_{i=1}^n k_i p_i, \quad (1)$$

где a_j – интегральный показатель для участка под номером j , баллы; k_i – весовой коэффициент фактора, p_i – показатель фактора, баллы; $i = 1 \dots n$ – число факторов; $j = 1 \dots m$ – число участков вдоль трассы трубопровода.

В качестве влияющих выбраны факторы, в наибольшей степени способствующие распространению нефтяного загрязнения на земной поверхности: водотоки, водоёмы и рельеф местности [14, 15]. Для получения числовых характеристик факторов в качестве их показателей выбраны соответственно: радиус потенциального разлива; наличие рек и ручьёв; наличие озёр; уклон поверхности.

В данном случае использовали средний уклон поверхности, рассчитанный с разре-

шением 500 м, на основе высотных данных компании ESRI (ArcGIS – Topographic maps). Максимальный уклон вдоль трассы нефтепровода составил 6,2%, средний уклон по всей трассе – 1,0%.

По данным дистанционного зондирования Земли из открытых источников (Яндекс.Карты), было подсчитано число водных объектов, пересекающих нефтепровод или находящихся ближе 50 м от него. Выделено две категории водных объектов: озёра; реки и ручьи. По данным критериям было принято во внимание 39 озёр, 20 пересечений ручьёв и рек.

Весовые коэффициенты были определены методом простого ранжирования (в порядке строгой иерархии факторов по их важности), выполненного авторами настоящей публикации. Данный метод позволяет достаточно просто находить весовые коэффициенты, не уступающие по качеству полученным другими подходами, и, в то же время свободен от недостатков, присущих ряду других методов [16].

Весовой коэффициент k для фактора с номером i определяется по следующей формуле:

$$k_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^4 n_i}, \quad (2)$$

где n_i – порядковый номер фактора, начиная с конца ($n_4 = 1, n_1 = 4$). Полученные по этой формуле значения весовых коэффициентов равны: 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 для радиуса потенциального разлива, наличия рек и ручьёв, наличия озёр и уклона поверхности соответственно. Такое распределение весовых коэффициентов вполне логично, поскольку загрязнение нефтью в почвах может сохраняться десятилетиями [17, 18]. Вторым по значимости фактором определена плотность водотоков, по которым нефть может быстро достигнуть акватории Баренцева моря. И хотя в его прибрежных районах загрязнение нефтяными углеводородами в настоящее время невелико [19, 20], смыв с суши и попадание через реки и ручьи нефти в морскую воду может резко увеличить загрязнение акватории и берегов [21, 22]. Два других фактора не играют столь важной роли при авариях, хотя также могут быть значимы при больших уклонах рельефа и попадании нефти в крупные озёра. Но применительно к данному случаю, они играют второстепенную роль, поскольку вдоль трассы трубопровода встречаются только мелкие озёра, а неровности рельефа не столь значительны для увеличения

площади растекания, что подтвердили численные эксперименты на модели.

Значения факторов нормированы по их максимальному значению: $p_k = p_k / p_{\max}$, где p_k – показатель фактора для участка нефтепровода с номером k , p_{\max} – максимальное значение показателя по всей трассе. Интегральный показатель a , учитывающий все факторы и их веса, был рассчитан следующим образом:

$$a = \sum_{i=1}^4 k_i p_i, \quad (3)$$

где обозначения те же, что и в формуле (1). К интегральному показателю была применена вербально-числовая пятиступенчатая шкала по степени опасности следующего вида: очень низкая (0–0,2); низкая (0,2–0,4); средняя (0,4–0,6); высокая (0,6–0,8); очень высокая (0,8–1,0).

Рассмотрим трассу нефтепровода «Центральный пункт сбора нефти Южное Хыльчую – Варандейский береговой резервуарный парк», расположенного на территории Ненецкого автономного округа. Его протяжённость составляет 153 км (без учёта технологических колен), диаметр 530 мм. Объём прокачки нефти – порядка 15,5 тыс. т/сут. По нефтепроводу транспортируется товарная нефть – смесь нефтей различных месторождений. Поскольку величина воздействия на природную среду зависит от состава нефти, для расчётов нами была взята нефть, наиболее близкая перекачиваемой по данному трубопроводу. По классификации ГОСТ Р 51858-2002 это лёгкая нефть, плотностью 830–850 кг/м³, при 20 °С, с вязкостью порядка 5 сСт. Исходя из вышеприведённых данных, дебит нефтепровода составляет $q_{\text{нп}} = 0,216$ м³/с. Для определения значений факторов нефтепровод был поделён на 306 равных участков по 0,5 км.

Прогноз радиуса потенциального разлива выполнен с использованием модели растекания нефти по поверхности суши, предложенной одним из авторов [23], с учётом её испарения с земной поверхности [24]. В данной модели процесс растекания нефти по поверхности представляется при помощи уравнения диффузионных волн [25]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}(D \text{ grad } h) + Q, \quad (4)$$

где $h = h(t, x, y)$ – толщина нефтяной плёнки, t – время, x, y – пространственные координаты, $D = D(h)$ – функция, определяющая скорость растекания флюида, $Q = Q(t, x, y)$ –

функция источника. Для данной модели наиболее важными являются характеристики нефти и грунтов. Основными показателями, определяющими тип грунта, являются проницаемость и максимальная глубина проникновения нефти. Для их определения можно воспользоваться картами почвенного районирования.

Исходя из карты почвенного районирования Ненецкого автономного округа масштаба 1:2500000 [26], рассматриваемый нефтепровод проложен на территории с шестью различными типам почв. Для выявления зон, наиболее подверженных нефтяному загрязнению, важен только верхний слой почв толщиной до 30–50 см. Во всех вышеописанных типах почв данный слой представляют торф различной степени разложения и мощностью слоя и глеевый горизонт [27, 28]. Так как последний имеет низкую проницаемость, он служит барьером для проникновения нефти вглубь.

В случае большого разнообразия типов почв, что мы имеем в данном случае, для установления их коэффициента фильтрации, можно воспользоваться лингвистическим анализом названий их типов. Модель для такого анализа предполагает решение соответствующей суффиксно-префиксной задачи, описанной в [29] и основанной на процедуре k-тестирования соответствующего языка.

Комбинаторно-автоматное решение задачи распознавания с верхней оценкой глубины тестирования k предложено Ж. Лаллеманом, [29], алгебраическое – одним из авторов [30]. Применение такого подхода позволяет существенно сократить число анализируемых лингвистических объектов.

В конечном итоге, в целях районирования было выделено 5 типов почв, для каждого из которых было рассчитано по 4 сценария разливов со следующими различиями (минимальными и максимальными значениями показателей): по размеру прорыва в нефтепроводе – 1,4 и 100% от его площади сечения; по влажности грунта – 0 и 80%. Прогнозируемые площади разливов были усреднены по сценариям для каждого из участков. Минимальный средний радиус при разливе 108 т составил 23,9 м, максимальный – 26,8 м. Каждому из 306 участков нефтепровода было присвоено значение показателя «Радиус потенциального разлива» в соответствии с данными расчётами.

Результаты и обсуждение

На рисунке отображены результаты районирования – схема распределения значений интегрального показателя по трассе нефтепровода и их вербальная интерпретация.

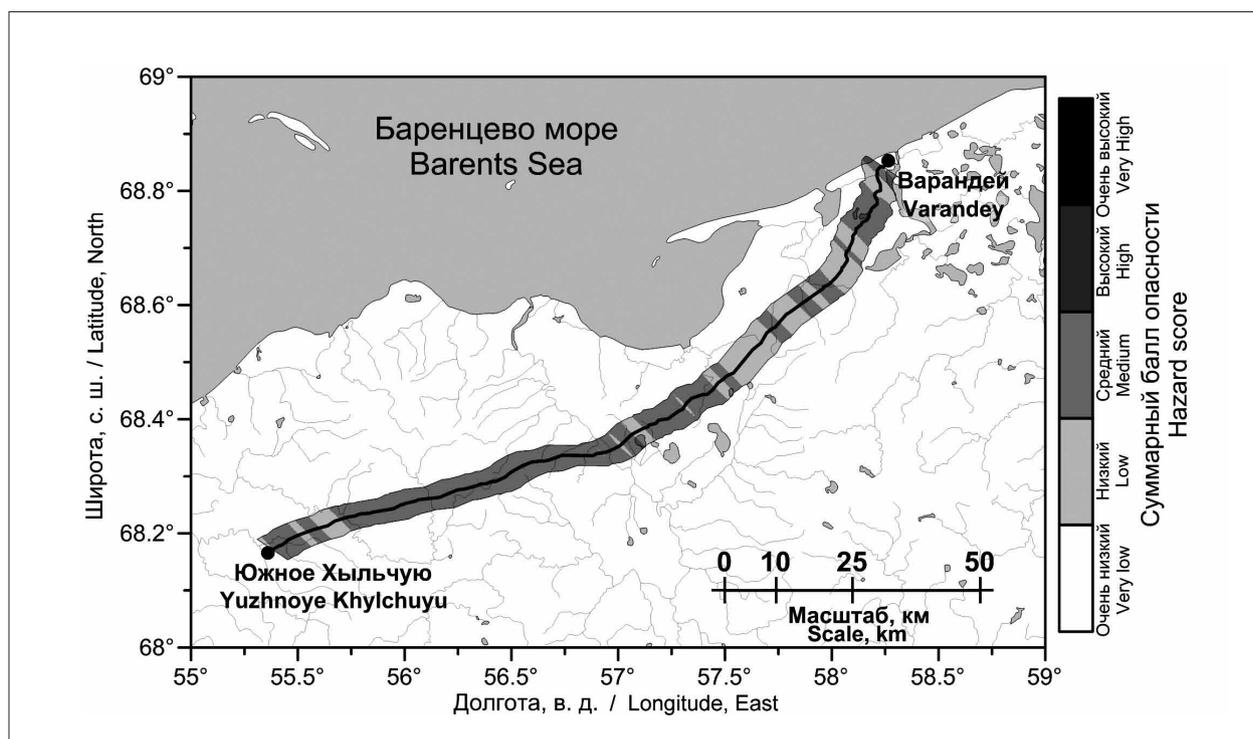


Рис. Схема распределения балла опасности для трассы нефтепровода «Южное Хыльчую – Варандей». Масштаб трассы нефтепровода на схеме увеличен, её реальная ширина составляет 100 м
 Fig. Hazard score distribution and its verbal characteristics (right side) for the “Yuzhnoye Khylychuyu – Varandey” pipeline. Real scale of pipeline corridor is equal to 100 meters

Максимальным значениям показателя опасности соответствуют участки нефтепровода с наибольшим числом водных объектов, что укладывается в общую картину понимания наносимого природной среде урона, так как масштабы аварии при попадании в них нефти могут существенно увеличиться. Минимальные значения индекса соответствуют участкам, на которых отсутствуют водные объекты, минимальный уклон местности и наименьшая прогнозируемая площадь загрязнения. На рассматриваемом нефтепроводе участки с очень низким и очень высоким суммарным баллом опасности отсутствуют. Есть единичные участки с высоким уровнем опасности, они связаны в большей мере с местами пересечения трассы нефтепровода с водными объектами. На юго-западной части нефтепровода преобладает средний уровень опасности. На северо-восточной – низкий, за исключением ближайших к п. Варандей 20 км нефтепровода, где ввиду большого количества озёр, малых рек и ручьев, уровень повышается до среднего.

Заключение

Применённый в работе метод, основанный на синтезе гидродинамической модели разливов нефти на поверхности суши и экспертной модели, учитывает такие важные факторы, с точки зрения выявления зон, наиболее подверженных разливам нефти, как уклон поверхности и наличие вблизи нефтепроводов водных объектов различного типа. Он позволяет, при помощи удобной для восприятия вербально-числовой шкалы, оценить степень воздействия на природную среду потенциальных аварийных ситуаций на нефтепроводах.

Эта задача актуальна, в первую очередь, при выборе мест размещения средств ликвидации разливов нефти, для более оперативного реагирования на аварийные ситуации, что может существенно снизить нанесённый природной среде урон. Помимо этого, данные оценки можно применять при проектировке как самих нефтепроводов, так и объектов нефтяной инфраструктуры, с той же целью минимизации ущерба от возможных аварийных ситуаций.

По результатам применения описанного метода для нефтепровода «Южное Хыльчюу – Варандей», расположенного в Ненецком автономном округе, и принимая во внимание низко развитую транспортную инфраструктуру региона, можно сделать вывод о необходимости размещения средств ликвидации не только

в конечном и начальном пункте нефтепровода, но и на его наиболее уязвимой части – первых 100 км от пункта Южное Хыльчюу.

References

1. Government report “State and protection of the environment in Russian Federation in 2017”. Moskva: Minprirody Rossii; NPP “Kadastr”, 2018. 888 p. (in Russian).
2. Annual report of Federal Agency for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. 2017 [Internet resource] http://gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (Accessed: 16.01.2019) (in Russian).
3. Fingas M. Oil spill science and technology. Gulf Professional Publishing, 2010. 1192 p.
4. Ramírez-Camacho J.G., Carbone F., Pastor E., Bubbico R., Casal J. Assessing the consequences of pipeline accidents to support land-use planning // *Safety Sci.* 2016. V. 97. P. 34–42. doi: 10.1016/j.ssci.2016.01.021
5. Belvederesi C., Thompson M.S., Komers P.E. Statistical analysis of environmental consequences of hazardous liquid pipeline accidents // *Heliyon.* 2018. V. 4 (11). P. e00901. doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00901
6. Bonvicini S., Antonioni G., Cozzani V. Assessment of the risk related to environmental damage following major accidents in onshore pipelines // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2018. V. 56. P. 505–516. doi: 10.1016/j.jlp.2018.11.005
7. Martins P.T.A., Riedel P.S., Milanelli J.C.C. Sensitivity mapping of oil pollution incidents in land environments // *Acta Scientiarum – Technology.* 2018. V. 40 (1). P. e30219. doi: 10.4025/actascitechnol.v40i1.30219
8. Gundlach E.R., Cekirge M., Anul C., Orhan C., Sutherland P. Pipeline and coastal environmental sensitivity mapping for the BTC pipeline system in Turkey // *Proceedings of International Oil Spill Conference (IOSC).* 2005. P. 10919–10923.
9. Ozgis M.S., Kaduk J.D., Jarvis C.H. Mapping terrestrial oil spill impact using machine learning random forest and Landsat 8 OLI imagery: A case site within the Niger Delta region of Nigeria // *Environmental Science and Pollution Research.* 2019. V. 26. No. 4. P. 3621–3635. doi: 10.1007/s11356-018-3824-y
10. Dziubinski M., Fratczak M., Markowski A.S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2006. V. 19. P. 399–408. doi: 10.1016/j.jlp.2005.10.007
11. Gibbons S., Shaw J., Tillotson S. Onshore oil spill modeling and assessment of potential socio-economic and environmental impacts from operational assets // *Society of Petroleum Engineers – SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition.* 2015. P. 1–25. doi: 10.2118/177352-RU
12. Melekhina E.N., Kanev V.A., Markarova M.Yu., Nadezhkin S.M., Nowakowski A.B., Taskaeva A.A.,

- Tarabukin D.V., Velegzhaninov I.O., Rasova E.E. Assessment of the state of oil-polluted ecosystems of European Subarctic: a multidisciplinary approach // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 2. P. 123–129 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-123-129
13. Engelhardt M. Petroleum effects in the Arctic environment. London; New York: Elsevier Appl. Sci. Publ., 1985. 281 p.
14. Gubaydullin M.G., Korobov V.B. Environmental monitoring of oil and gas production objects of European North of Russia. Arkhangelsk: NArFU, 2012. 236 p. (in Russian).
15. Kumari A., Kaur R., Kaur R. A review on fate and remediation techniques of oil spills // *International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences*. 2019. V. 10. No. 1. P. 111–116. doi: 10.26452/ijrps.v10i1.1786
16. Korobov V.B. Some problems of practical application of expert methods // *Nauchnyy dialog*. 2013. No. 3 (15). *Estestvoznaniye. Ekologiya. Nauki o zemle*. P. 94–108 (in Russian).
17. Solntseva N.P. Oil production and geochemistry of natural landscapes. Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 1998. 376 p. (in Russian).
18. Morales-Bautista C.M., Adams R.H., Hernandez-Barajas J.R., Lobato-Garcia C.E., Torres-Torres J.G. Characterization of fresh and weathered petroleum for potential impacts to soil fertility // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2016. V. 13. No. 11. P. 2689–2696. doi: 10.1007/s13762-016-1097-x
19. Ivanov A.Yu., Terleyeva N.V., Evtushenko N.V., Kucheyko A.Yu., Filimonova N.A., Kucheyko A.A. The main results of satellite radar monitoring of oil spills in the Barents Sea // *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*. 2017. V. 3. P. 17–32 (in Russian).
20. Langangen Ø., Olsen E., Stige L.C., Ohlberger J., Yaragina N.A., Vikebø F.B., Bogstad B., Stenseth N.C., Hjermann D.Ø. The effects of oil spills on marine fish: Implications of spatial variation in natural mortality // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. V. 119. No. 1. P. 102–109. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.03.037
21. Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P., Bogunov A.Y. Contents and compositions of hydrocarbons in bottom sediments at the Severnaya Dvina-White Sea geochemical barrier // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 414 (1). P. 609–614. doi: 10.1134/S1028334X0704026
22. Fedorov Yu.A., Kuznetsov A.N., Stradomskaya A.G. Regularities in the transformation of oil pollution in watercourses based on long-term observational data // *Water Resources*. 2006. V. 33. No. 3. P. 300–309. doi: 10.1134/S0097807806030079
23. Pavlenko V.I., Muangu Zh., Korobov V.B., Lokhov A.S. The pressing problems of prevention and removal of oil spills in the Arctic and the methods of assessment of environmental damage to coastal areas // *Arktika: Ekologiya i ekonomika*. 2015. V. 3 (19). P. 4–11 (in Russian).
24. Gubaydullin M.G., Lokhov A.S., Korobov V.B., Tarasova G.M. Experimental study of oil evaporation, related to the problems of modeling environmental pollution by spillages on the ground in the Arctic region // *Problemy sbora podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov*. 2016. V. 4 (106). P. 137–145 (in Russian).
25. Kuchment L.S. Models of river flow formation processes. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 143 p. (in Russian).
26. Atlas of the Arkhangelsk Oblast. Moskva: GUGK, 1976. 72 p. (in Russian).
27. Goryachkin S.V. The soil covering of the Russian North (structure, genesis, ecology, evolution). Moskva: GEOS, 2010. 421 p. (in Russian).
28. Dobrovolskiy G.V., Taskayev A.I., Zaboyeva I.V. Atlas of the Komi Republic soils. Syktyvkar: Komi respublikanskaya tipografiya, 2010. 356 p. (in Russian).
29. Lallement G. Semigroups and combinatorial applications. Moskva: Mir, 1985. 440 p. (in Russian).
30. Tutygin A.G., Sulimov V.A. Semigroup problem for k-tested languages // *Vestnik matematicheskogo fakul'teta*. 1997. V. 1. P. 61–63 (in Russian).