

УДК 543.38:543.51

## ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ

© 2017 г. Л. К. Алтунина<sup>1</sup>, Л. И. Сваровская<sup>1,\*</sup>, И. Г. Яценко<sup>1</sup>, Е. А. Ельчанинова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химии нефти СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

\*E-mail: sli@ipc.tsc.ru

Поступила в редакцию 31.03.2016 г.

В районе Среднего Приобья на территории Советского, Майского и Фестивального месторождений Западной Сибири исследованы нефтезагрязненные участки водосборных бассейнов малых рек. Концентрация загрязнения составила 29–60 г/кг, для фонового участка – 1.8 г/кг. В составе загрязняющей нефти определены ациклические и ароматические углеводородные структуры, среди которых наиболее токсичными являются пирены, хризены и бензантрацены. Расчет модуля смыва нефтепродуктов и их суммарного годового поступления в речную систему проведен с применением данных лабораторных исследований, космоснимков Landsat и программных продуктов ASTER GDEM, SRTM.

**Ключевые слова:** разлив нефти, водосборный бассейн, сток нефтепродуктов в реки, геоинформационные системы.

**DOI:** 10.7868/S0028242117020034

Проблемы экологии окружающей среды с каждым годом становятся все более актуальными. Особую обеспокоенность вызывают северные районы нефтедобычи, где тысячи километров нефтепроводов проложены по обводненной труднодоступной болотистой местности, что обуславливает высокий риск загрязнения обширных территорий при аварийных ситуациях. Нами исследованы территории Майского, Фестивального и Советского месторождений северных районов Томской области, расположенных в пойме среднего течения р. Оби и относящихся к территории водосбора малых рек: Елизаровки, Ай-Кагал и протоки Посал соответственно. Вода большинства рек на территории нефтедобывающих комплексов в результате аварийных ситуаций загрязнена нефтепродуктами, железом, фенолами [1–3]. Горизонтальное перемещение нефтепродуктов (геохимическая миграция) происходит с поверхностным стоком во время ливневых дождей, паводков и таяния снега [4]. В связи с этим представляется актуальным определение концентрации, площади загрязнения и объема смыва нефтепродуктов в речную систему на территории водосборных бассейнов малых рек [5, 6]. Нефтяные разливы на территории водосбора влияют на экологическую безопасность водных объектов, что определяет деятельность в сфере рационального природопользования, социальной политики и здоровья населения.

Цель работы – комплексная оценка техногенного влияния нефтедобывающих предприятий на экологию малых рек по данным наземных исследований и геоинформационных технологий.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами физико-химических и микробиологических исследований служили образцы воды и почвы, отобранные на территории Советского, Майского и Фестивального месторождений, занимающих значительную часть площади водосборных бассейнов малых рек Среднего Приобья.

Концентрацию нефти в отобранных образцах определяли методом 3-х кратной экстракции хлороформом [7]. Экстрагированную нефть анализировали на приборе ИК-Фурье спектрометр Nikolet 5700 с Raman модулем (Thermo Electron, США). Спектральный диапазон 400–4000 см<sup>-1</sup>. По отношению значений оптических плотностей полос поглощения рассчитывали коэффициент окисленности:  $D_{1710}/D_{1465}$ , характеризующий деградационную активность бактерий исследуемых загрязненных участков водосбора [8].

Молекулярно-массовое распределение (ММР) насыщенных ациклических углеводородов (УВ) экстрагированной нефти исследовали методом ГЖХ на хроматографе “Кристалл-2000” с кварцевой капиллярной колонкой 25 м × 0.22 мм, стационарная фаза SE-52. По данным ГЖХ рассчитаны

**Таблица 1.** Концентрация загрязнения, коэффициент окисленности и численность микрофлоры в пробах загрязненной почвы, отобранных на территории водосбора р. Посал

Образец почвы, №	Концентрация нефтезагрязнения, г/кг	Число гетеротрофных микроорганизмов, млн КОЕ/г		Коэффициент окисленности
		на МПА	на КАА	
1 (фон)	1.8	3.7	1.85	4.30
2	45.0	0.9	0.67	0.64
3	35.0	1.2	0.90	1.23
4	29.0	1.6	1.72	1.40
5	60.0	0.4	0.34	0.33
6	52.0	0.5	0.56	0.52

некоторые биомаркеры и коэффициент биодеструкции по формуле:  $K_{\text{био}} = (Pr + Ph)/(nC_{17} + nC_{18})$ . Индивидуальный состав ароматических УВ загрязняющей нефти определяли методом газовой хромато-масс-спектрометрии с использованием прибора DFS фирмы “Thermo Scientific” (Германия).

Общую численность гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах утилизации нефтепродуктов, определяли классическим методом посева на мясо-пептонный (МПА) и крахмало-аммиачный (КАА) агар.

С целью определения площади водосборных бассейнов на труднодоступной, заболоченной территории, моделирования зон риска и определения площади загрязнения использовали метод дешифрирования космических снимков [9].

Модуль и массу смыва нефтепродуктов с загрязненных участков в речную систему определяли с применением формул 1 и 2:

$$\mu = 0.42M_3 \left[ 1 - \exp\left(-40 \frac{f_3}{F}\right) \right] + a_{\text{ф}}M \left(1 - \frac{f_3}{F}\right), \quad (1)$$

где  $\mu$  – модуль смыва нефти (мг/с км<sup>2</sup>);  $M_3$  – модуль стока воды с нефтезагрязненного участка водосбора (дм<sup>3</sup>/с км<sup>2</sup>);  $f_3$  – площадь нефтезагрязненных участков (км<sup>2</sup>),  $F$  – общая площадь водосбора (км<sup>2</sup>), автоматически выделенная с использованием программного продукта ASTER GDEM;  $a_{\text{ф}}$  – фоновое содержание нефтепродуктов в природных водах;  $M$  – обобщенный по территории модуль стока воды (дм<sup>3</sup>/с км<sup>2</sup>);

$$V = \frac{\mu TF}{10^9}, \quad (2)$$

где  $V$  – среднегодовая масса выноса нефтепродуктов в реку ( $T$ ):  $T_1$  – в весенне-осенний период, который составляет 183 дня с 21 апреля по 21 октября;  $T_2$  – период весеннего половодья – 77 дней с 21 апреля по 7 июля, за который происходит наиболее интенсивный вынос нефтепродуктов;  $F$  – площадь водосбора (км<sup>2</sup>).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью геоинформационных технологий нами определена площадь водосбора малых рек. В районе Советского месторождения, для протоки Посал и ее малых притоков (пойма р. Оби) площадь водосбора составляет 732 км<sup>2</sup>, в районе месторождений Фестивального и Майского – для малых рек Ай-Кагал и Елизаровка – 352 и 238 км<sup>2</sup> соответственно. Почти половину площади водосбора исследуемых малых рек занимают нефтедобывающие структуры с сетью промышленных нефтепроводов, представляющих высокий риск загрязнения территории в случае аварийной ситуации. В табл. 1 приведены данные физико-химических, микробиологических и спектрометрических исследований проб загрязненной почвы, отобранных на территории Советского месторождения. Коэффициент окисленности рассчитан по данным ИК-спектрометрии.

Из данных таблицы следует, что концентрация загрязнения фонового образца почвы нефтепродуктами составила 1.8 г/кг. Причиной загрязнения могут служить продукты горящих факелов попутного нефтяного газа и испарения УВ с загрязненной поверхности, которые в виде аэрозолей переносятся на значительные расстояния. Высокий коэффициент окисленности нефти фонового участка (4.3) подтверждает дегидрогеназную активность микроорганизмов, численность которых на средах МПА и КАА составила 3.7 и 1.85. В пробах загрязненной почвы значения коэффициентов окисленности не превышают 1.4, концентрация загрязнения 29–60 г/кг. Следовательно, высокие концентрации нефтезагрязнения ингибируют численность и окислительную активность почвенной микрофлоры, естественная утилизация нефти протекает медленно. Способность бактерий утилизировать почти все известные УВ осуществляется за счет оксигеназной активности микроорганизмов, которая зависит от численности и концентрации загрязнения [10, 11]. Используя данные хроматографического ана-

**Таблица 2.** Биомаркеры нефти, экстрагированной из отобранных образцов почвы

Биомаркеры Концентрация загрязнения, г/кг	Номер образца почвы					
	1 (фон)	2	3	4	5	6
	1.8	45.0	35.0	29.0	60.0	52.0
	Значения биомаркеров					
Pr/Ph	0.75	0.77	0.84	0.86	0.87	0.76
Pr/C <sub>17</sub>	1.9	0.8	1.07	1.19	0.64	0.69
Ph/C <sub>18</sub>	1.6	0.9	1.12	1.18	0.7	0.8
Pr + Ph/C <sub>17</sub> + C <sub>18</sub>	2.6	0.8	1.16	1.24	0.47	0.75

лиза УВ нефти, нами рассчитаны биомаркеры, отражающие степень утилизации УВ в почве с разной концентрацией загрязнения (табл. 2)

Значения биомаркера, определяемого отношением величин пристана к фитану (Pr/Ph), изменяются незначительно, поскольку Pr и Ph характеризуются особой устойчивостью при взаимодействии с микроорганизмами. Значение биомаркера больше единицы свидетельствует о процессах деструкции УВ, что характерно для образца фоновой почвы и, в меньшей степени, для образцов №№ 3, 4.

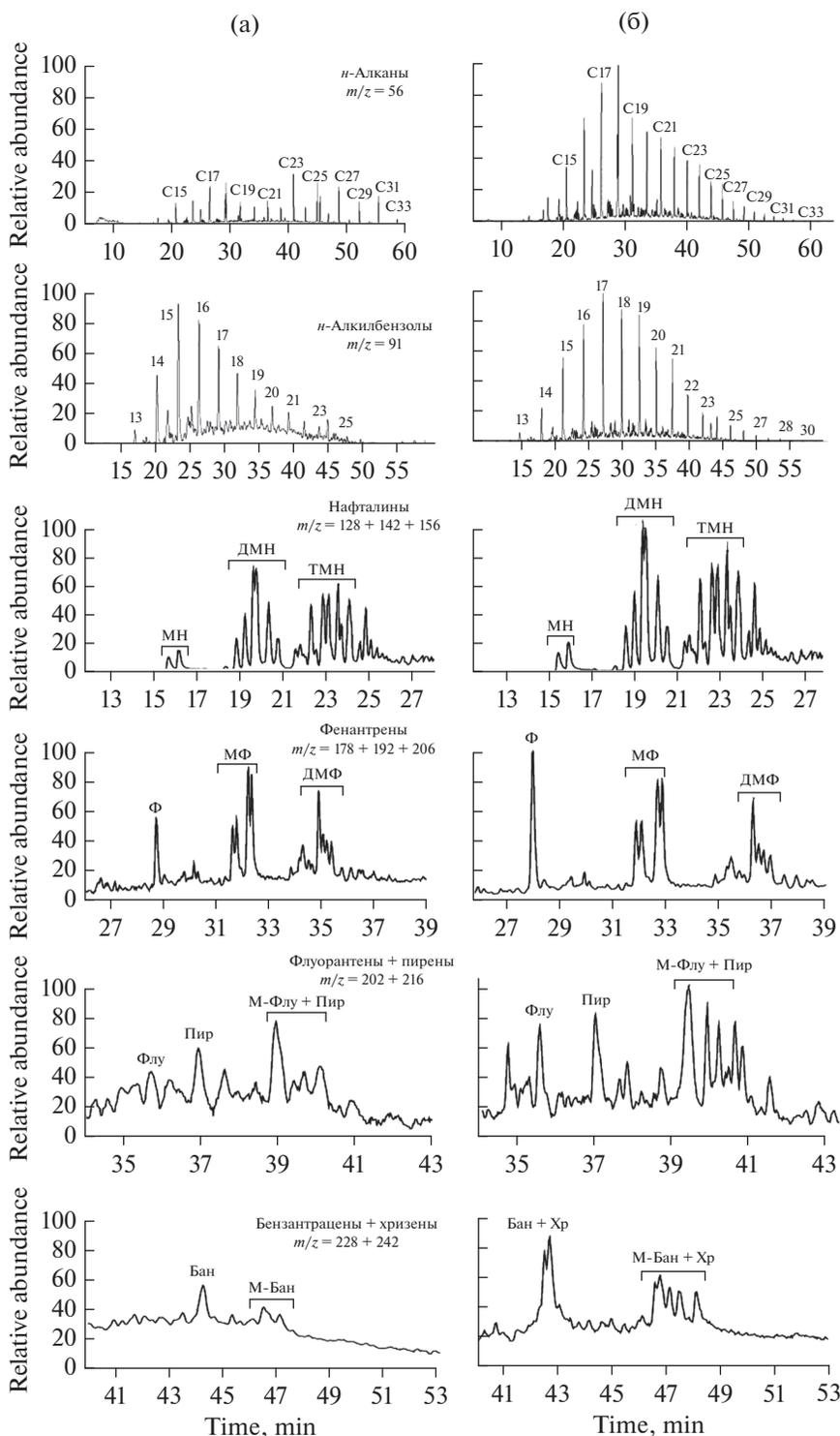
Максимальные значения биомаркеров отмечены для нефти фоновой почвы, где определена относительно высокая численность микрофлоры, низкая концентрация загрязнения и значительный показатель коэффициента окисленности. Для образцов почвы №№ 2, 5 и 6 значения биомаркеров составляют меньше единицы, что подтверждает ингибирование процессов биодеструкции УВ нефти вследствие высокой концентрации загрязнения – 45, 52 и 60 г/кг соответственно (табл. 2).

Хромато-масс-спектрометрический анализ нефтей, экстрагированных из загрязненных участков на территории водосборного бассейна протоки Посал (Советское месторождение), показал одинаковый состав УВ, представленный 3-мя гомологическими рядами – алканы, арены и гетеротрофные соединения (дибензтиофены). В состав ароматических УВ входят основные структурные единицы: бензол, нафталин, фенантрен, пирен, антрацен и хризен. Их общая формула  $C_nH_{2n-p}$ , где “*p*” изменяется в соответствии с числом ароматических колец. Для примера на рисунке представлены масс-фрагментограммы УВ нефтей, экстрагированных из образцов фоновой почвы и пробы № 5 с максимальным загрязнением (60 г/кг).

Алканы, алкилбензолы и хризены фонового участка (рисунок, а), реконструированные по ионам с  $m/z$  56 и 91, 228 и 242, показали некоторые отличия в их ММР за счет биодеструктивных изменений, что подтверждают данные ГЖХ и ИК-спектрометрии. Содержание в нефтях пиренов, бензантраценов и хризен, проявляющих канцерогенную активность, представляют особую опасность при загрязнении водосборного бассейна.

Концентрация загрязнения нефтепродуктами воды малых рек на территории исследуемых месторождений превышает предельно допустимые нормы (ПДК) в 3–6 раз. Экологические возможности микробных сообществ по очистке загрязненных водных экосистем северных территорий, весьма ограничены вследствие короткого летнего периода и общего низкотемпературного режима. Численность микроорганизмов в пробах воды малых рек, отобранных в летний период (июнь–август) не превышают  $25 \times 10^3$  КОЕ/дм<sup>3</sup>, в пробах донных отложений – до  $64 \times 10^3$  КОЕ/г.

Высокий риск загрязнения воды на территории нефтедобычи, в случае аварийной ситуации, связан с многочисленными переходами сети промышленных нефтепроводов через малые реки. С использованием методов дистанционного зондирования и программных продуктов ASTER GDEM и SRTM нами определены точки перехода нефтепроводов через реки: протоку Посал – 68, малые реки Ай-Каган и Елизаровка – 376 точек. Результаты полевых исследований, математические расчеты и данные, полученные с применением ГИС технологий, позволили определить модуль смыва и годовой вынос нефтепродуктов с загрязненной территории водосборов в систему малых рек. Для рек Ай-Кагал и Елизаровка на территории Фестивального и Майского месторождений годовой смыв нефтепродуктов составил 1.7 и 1.3 т соответственно. Расчет годового



Масс-фрагментограммы УВ нефти, экстрагированной из фонового (а) и загрязненного (б) образцов почвы.

смыва нефтепродуктов в протоку Посал на территории Советского месторождения представлено в табл. 3.

Из данных таблицы следует, что среднегодовой объем выноса нефтепродуктов в протоку По-

сал (приток Оби) на территории Советского месторождения в разные годы составил 3.1 и 4.9 т. При аварийной ситуации на нефтепроводе за максимально возможное загрязнение территории водосбора принято считать 1% от всей площади

**Таблица 3.** Модуль смыва и объем выноса нефтепродуктов (*V*) в протоку Посал

Бассейн реки	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Площадь нефтезагрязненных участков ( <i>f</i> <sub>3</sub> )		<i>a</i> <sub>ф</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Модуль смыва нефтепродуктов ( <i>μ</i> ), мг/с км <sup>2</sup>		Среднегодовой объем выноса нефти ( <i>V</i> ), т	
		км <sup>2</sup>	%		весен. период	год	весен. период	год
Данные, рассчитанные для 1999 г.								
п. Посал	731.85	2.2	0.3	0.05	0.42	0.65	3.2	4.9
Прогноз при максимальном нефтяном загрязнении (1% от всей площади водосбора)								
п. Посал	731.85	7.3	1.0	0.05	0.9	1.4	7.0	10.7
Данные, рассчитанные для 2015 г.								
п. Посал	731.85	1.5	0.2	0.05	0.3	0.5	1.4	3.1

водосбора реки. При этом годовой сток нефтепродуктов в реку Посал может составить 10.7 т (табл. 3).

Таким образом, нефтепродукты, содержащие канцерогенные УВ, перемещаемые с поверхностным стоком в речную систему, составляют значительные объемы, что ухудшает качество воды, и как следствие, обостряет социальные проблемы, связанные с неблагоприятными изменениями условий жизни и здоровья населения.

Таким образом, результаты оценки экологического состояния водосборных бассейнов малых рек Среднего Приобья, на территории которых расположены нефтедобывающие предприятия с сетью промысловых нефтепроводов, показали, что основными загрязнителями речной системы является нефть и нефтепродукты, концентрация которых превышает ПДК в 3–6 раз. Высокий риск загрязнения при аварийных ситуациях представляют многочисленные переходы нефтепроводов (68–376 точек перехода) через малые реки на территории Советского, Фестивального и Майского месторождений.

Методом хромато-масс-спектрометрического анализа нефти, экстрагированной из загрязненных проб почвы территории водосбора малых рек, выявлен ряд углеводородных структур: алканы нормального и изопреноидного строения, алкилбензолы, полиароматические углеводороды (ПАУ) и дибензотиофены, представляющие опасность при загрязнении рек во время паводков и ливневых дождей.

Среднегодовой объем выноса нефтепродуктов в систему малых рек в разные годы может составить от 1.3 до 4.9 т. В случае моделирования аварийной ситуации с максимально возможным за-

грязнением территории водосбора (1%), среднегодовой смыв нефтепродуктов в протоку Посал увеличится до 10.7 т.

Смыв в реку нефтепродуктов, содержащих канцерогенные углеводороды, представляет особую опасность, поскольку вода малых рек Северных районов используется местным населением и рабочими нефтяных промыслов в питьевых целях.

Эффективные методы рекультивации и профилактические мероприятия, направленные на предотвращение аварий на нефтепроводе, несомненно, повысят качество речной воды и решат проблемы взаимоотношений окружающей среды и человека.

Данные ГИС-технологий, математических расчетов, физико-химических и микробиологических методов исследования, позволят своевременно оценить масштаб загрязнения территории, определить концентрацию загрязнения, состав загрязняющих углеводородов и планировать рекультивационные мероприятия на труднодоступных заболоченных территориях нефтедобывающих предприятий.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта НИР V.46.5.5, выполняемого в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований (ФНИ) государственных академий наук на 2013–2020 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сваровская Л.И., Яценко И.Г., Алтунина Л.К. // Журн. оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 4. С. 332.

2. Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Полищук Ю.М., Токарева О.С. // Нефтехимия. 2011. Т. 51. № 5. С. 387.
3. Svarovskaya L.I., Altunina L.K., Filatov D.A. // Eurasian ChemTech Journal. 2008. № 10. P. 1.
4. Яценко И.Г., Перемитина Т.О., Лучкова С.В. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 4. С. 5.
5. Хорошавин В.Ю. // Журн. Вестник Тюменского государственного университета. 2010. № 7. С. 156.
6. Симонова Н.Л. Дис. ... канд. геогр. наук. Екатеринбург. РГБ. 2006. 174 с.
7. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. Практическое руководство. М.: Изд-во Бином, 2007.
8. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М.: МГУ. 2012. С. 54.
9. ArcHydro Tools. USA: ESRI, 2011. 184 с.
10. Greenword P.F., Wibrow S., George S.J., Tibbett M. // J. Organ. Geochemistry. 2009. № 40. P. 293.
11. Margesin R., Schinner F. // J. Appl. Environ. Microbiol. 2001. № 67. P. 3127.