

УДК 543.38:543.51

## Оценка загрязнения нефтепродуктами водных объектов бассейна Средней Оби по спутниковым и наземным данным

Л. К. АЛТУНИНА, Л. И. СВАРОВСКАЯ, И. Г. ЯЩЕНКО

*Институт химии нефти Сибирского отделения РАН,  
проспект Академический, 4, Томск 634021 (Россия)**E-mail: alk@ipc.tsc.ru*

(Поступила 02.07.14; после доработки 11.11.14)

### Аннотация

Установлено, что основными загрязняющими веществами речной системы на территории разрабатываемых месторождений Томской области являются нефть и нефтепродукты, содержание которых в воде превышает предельно допустимые концентрации. Показано, что космоснимки и данные дистанционного зондирования Landsat и ASTER GDEM, SRTM можно использовать с целью картографирования зон разливов нефти, для оценки рисков загрязнения водных объектов и расчета модуля смыва нефтепродуктов с нефтезагрязненных водосборов для определения их суммарного годового поступления в речную систему.

**Ключевые слова:** водосборные бассейны рек, экология, нефтезагрязнение, смыв нефтепродуктов, космические снимки, дистанционное зондирование

### ВВЕДЕНИЕ

Аварийные разливы нефти, загрязняющие почву, растительность и водные объекты, происходят на всех этапах: добычи, хранения и транспортировки нефти. При аварийных ситуациях и во время весенних паводков нефтепродукты выносятся в гидросеть и становятся опасными для биогеоценозов, даже удаленных от места разлива нефти [1, 2]. Горизонтальное перемещение нефтепродуктов (геохимическая миграция) происходит с поверхностным стоком в водные объекты, ухудшая качество воды и, как следствие, обостряя социальные проблемы, связанные с неблагоприятными изменениями условий жизни и здоровья населения [3–6].

Особую обеспокоенность вызывают северные районы нефтедобычи, где тысячи километров нефтепроводов проложены по обводненной труднодоступной болотистой местности [7]. В связи с этим представляется актуаль-

ной оценка массы смыва нефтепродуктов с нефтезагрязненных участков в реки с применением геоинформационных технологий [8, 9].

Цель работы – определение риска загрязнения водосборных бассейнов Средней Оби и ее притока (р. Васюган), на территории которых находятся нефтедобывающие предприятия Западной Сибири, а также расчет массы выноса нефтепродуктов в речную систему с применением данных дистанционного зондирования и наземных исследований.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе исследовали пробы воды из рек Томской области, на территории водосборных бассейнов которых расположены нефтедобывающие предприятия.

Для физико-химических и микробиологических исследований отобраны пробы почвы с территории водосборных бассейнов и пробы

воды из водных объектов. Загрязняющие нефтепродукты из почвы извлекали хлороформом методом горячей экстракции на аппарате Сокслета, из воды – с добавлением хлороформа и отделением хлороформного экстракта нефти на делительной воронке. Хлороформ удаляли с применением ротационного испарителя. Полученную массу нефти определяли гравиметрическим методом [10]. Нефть анализировали методом ИК-спектроскопии на приборе ИК-Фурье спектрометр *Nikolet 5700*.

Общую численность микроорганизмов, принимающих активное участие в процессах утилизации нефти, определяли в отобранных пробах почвы методом посева на агаризованные среды [11].

С целью картографирования нефтезагрязненных участков на территории месторождений и моделирования зон риска загрязнения водных объектов использовали данные, полученные методом обработки космических снимков *Landsat* и *ASTER GDEM*, *SRTM* [12].

Для моделирования влияния нефтедобывающей промышленности на качество поверхностных вод применялись спутниковые снимки – цифровые модели рельефа *ASTER GDEM* и *SRTM*. Глобальная цифровая модель рельефа (*Global Digital Elevation Model, GDEM*) создана зарубежными специалистами на основе данных усовершенствованного спутникового радиометра теплового излучения и отражения (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER*, разрешение примерно 30 м) и доступна в сети интернет. Метод *ASTER GDEM* охватывает поверхность суши между 83° с. ш. и 83° ю. ш. и насчитывает 22 600 фрагментов размером 1° × 1°. Модель *ASTER GDEM* распространяется в формате *GeoTIFF* в географической системе координат (широта/долгота – *WGS84/EGM96*), разрешение – 1 угловая секунда (примерно 30 м). Оценка точности глобального продукта составляла 20 м (95 % доверительный интервал) для данных по вертикали и 30 м (95 % доверительный интервал) по горизонтали.

Данные радарной топографической съемки (*Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM*), полученные зарубежными специалистами в феврале 2000 г. с помощью радиолокационных сенсоров *SIR-C* и *X-SAR*, охватывают практически всю территорию земного шара,

за исключением самых северных (>60 с. ш.), самых южных широт (>54 ю. ш.) и океанов. Оценка точности космических снимков, по данным различных авторов, варьирует от 2.9 до 16 м на равнинной местности. Космические снимки (КС) *ASTER GDEM* и *SRTM* доступны в сети интернет, наглядно характеризуют рельеф поверхности Земли и при использовании геоинформационных программ позволяют моделировать влияние нефтедобывающей промышленности на качество поверхностных вод.

Обработка и анализ данных *ASTER GDEM* и *SRTM* проводились с помощью программного приложения *Arc Hydro Tools* в среде геоинформационной системы *ARC GIS* – специализированного гидрологического приложения *ARC GIS* для моделирования и расчета основных характеристик потоков воды и водосборов [13]. Суммарное годовое поступление нефтепродуктов в речную систему и массу смыва с нефтезагрязненных участков водосборных бассейнов рек рассчитывали по методикам, приведенным в работах [14, 15].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Загрязнение рек Томской области*

Исследования проводили для территории водосборных бассейнов р. Васюган и протоки Посал, относящихся к бассейну Средней Оби. Из-за интенсивного хозяйственного освоения качество воды в р. Оби постепенно ухудшается. Продукты загрязнения поступают в основном со стоком впадающих рек, которые протекают по районам с развитой промышленностью. Помимо прямого сброса сточных вод на качество поверхностных вод влияют заболоченные лесные массивы, “обогащающие” водные объекты органическими веществами. Особенно неблагоприятная обстановка складывается на реках Обского бассейна, где ведется интенсивная нефтедобыча. На территории Томской области в настоящее время открыто 131 месторождение нефти и газа, из них в разработке находится 56. Основная добыча углеводородного сырья осуществляется на территории Александровского и Каргасокского районов Томской области. На всех объектах нефтегазодобывающего комплекса

области в 2012 г. зарегистрирован 601 аварийный отказ оборудования, в 2011 г. – 678 отказов. Аварии на промысловых нефтепроводах сопровождаются выбросом нефти и сопутствующей высокоминерализованной пластовой воды, что губительно влияет на почву и растительный покров [16].

В 2012 г. предприятиями Александровского района в поверхностные воды сброшено 5628.49 тыс. м<sup>3</sup> сточных вод (из них нормативно-очищенных – 15.83 тыс. м<sup>3</sup>), предприятиями Каргасокского района – 463.61 тыс. м<sup>3</sup> (из них нормативно-очищенных – 28.25 тыс. м<sup>3</sup>). Максимальный вклад в суммарную загрязненность вод основных и малых рек вносят хлориды, нитраты, сульфаты – компоненты минеральных удобрений, используемых в сельском хозяйстве (табл. 1). Превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) по нефтепродуктам составляет сотни раз при норме 0.05 мг/дм<sup>3</sup>. Из данных табл. 1 следует, что в 2012 г. содержание нефти и нефтепродуктов в поверхностных водах Александровского и Каргасокского районов понизилось на 13 и 22 % соответственно. Следует отметить, что в целом состояние водных объектов в Александровском районе неблагоприятное: в 2012 г. шесть из девяти показателей качества воды ухудшились.

Микробиологические исследования показали, что в летний период (июнь–август) численность аэробной гетеротрофной микрофлоры в пробах воды р. Оби составила 10–16, р. Ва-

сюган – 15–18 тыс. кл./дм<sup>3</sup>. В донных отложениях численность микроорганизмов определялась в интервале 38–54 тыс. кл./дм<sup>3</sup>. Максимальное увеличение численности микроорганизмов отмечается после осенних паводков, способствующих поступлению органических и минеральных веществ с территории водосбора.

В условиях северных районов период микробиологической деструкции загрязнителей ограничен абиотическими факторами, среди которых ведущее место занимают температура и насыщенность кислородом. При низкой температуре, дефиците кислорода и высокой загрязненности численность и активность микробных сообществ резко снижается.

#### *Применение ГИС-технологий и спутниковых данных для комплексной оценки территории нефтезагрязнения*

Значительная часть магистральных и кустовых нефтепроводов на севере Томской области проложены по труднодоступной болотистой территории, в поймах рек и на надпойменных террасах. Для оценки загрязнения труднодоступных мест мы применили современные ГИС-технологии и методы дистанционного зондирования с использованием спутниковых данных ASTER GDEM и SRTM.

Цифровые карты-схемы с обозначением зон риска загрязнения построены для Совет-

ТАБЛИЦА 1

Содержание загрязняющих веществ в поверхностных водах Александровского и Каргасокского нефтедобывающих районов Томской области

Показатели	Александровский			Каргасокский		
	Масса <i>m</i> , т		$\Delta m$ , т	Масса <i>m</i> , т		$\Delta m$ , т
	2011 г.	2012 г.		2011 г.	2012 г.	
Азот аммонийный	9.05	16.96	+7.91	2.81	2.42	-0.39
Фосфаты	14.01	14.73	+0.72	0.72	0.49	-0.23
Хлориды	309.20	274.60	-34.60	23.35	25.67	+2.32
Нитраты	474.99	494.37	+19.38	18.02	21.3	+3.28
Нитриты	1.09	1.45	+0.36	0.14	0.13	-0.01
Сульфаты	95.98	120.39	+24.41	14.15	9.03	-5.12
Нефть и нефтепродукты	0.33	0.29	-0.04	0.11	0.09	-0.02
Синтетические ПАВ	0.46	0.55	+0.09	0.09	0.09	0
Сухой остаток	2568.1	2385.6	-182.5	267.35	255.83	-11.52

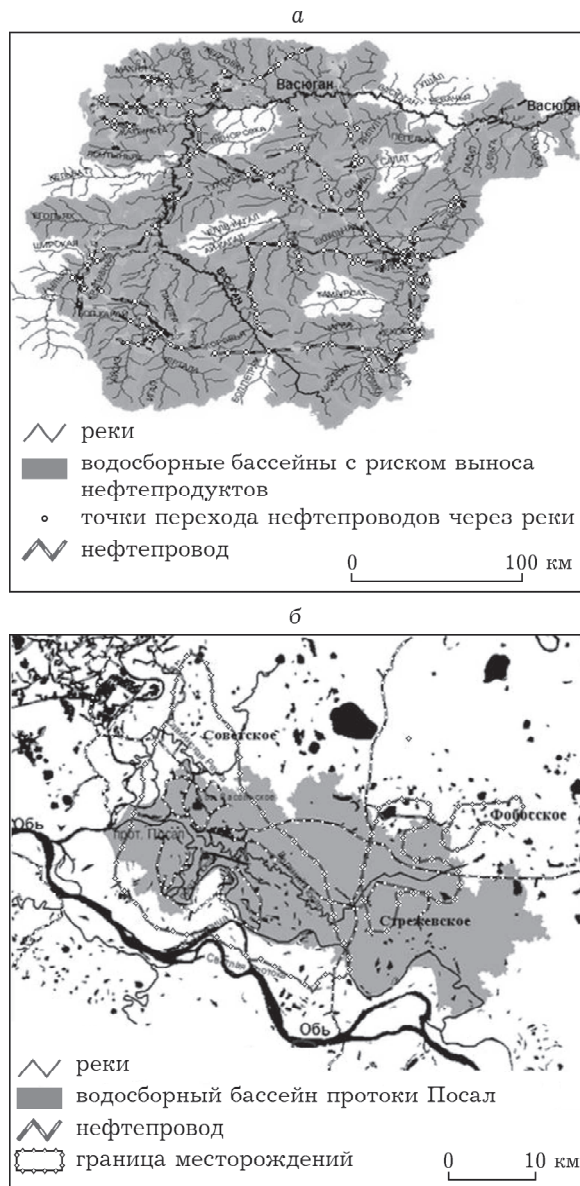


Рис. 1. Карта-схема водосборных бассейнов рек Васюган (а) и Средней Оби (б).

ского, Майского и Фестивального месторождений. На картах-схемах (рис. 1) выделены места перехода нефтепроводов через малые реки водосборного бассейна р. Васюган (376 точек), пойму р. Оби и протоки Посал (68 точек); обозначены зоны риска загрязнения территории водосборного бассейна р. Васюган и протоки Посал (Советское месторождение). В случае аварийной ситуации переход нефтепровода через водную преграду создает высокий риск загрязнения нефтью водосборных бассейнов и рек.

В зоне риска нефтезагрязнения на территории кустов добывающих скважин Совет-

ского месторождения отобраны пробы загрязненной почвы в пойме протоки Посал (рис. 2). В пробах определена концентрация загрязняющих веществ, численность общей гетеротрофной микрофлоры и группы актиномицетов, принимающих активное участие в процессах окисления углеводородов нефти. При биодеструкции загрязняющей нефти в зависимости от численности, состава и активности почвенного биоценоза загрязняющие токсичные компоненты преобразуются в менее или совсем нетоксичные [17].

По данным ИК-спектрометрического анализа нефти, экстрагированной из почвы, рассчитан коэффициент окисленности. Его величина указывает на низкую активность процессов деструкции углеводородов нефти при высокой концентрации загрязняющих веществ (рис. 3). Видно, что высокая (45–52%) концентрация загрязнения почвы нефтепродуктами в пробах № 6, 205 и 251 ингибирует численность, активность микроорганизмов и коэффициент окисленности. Для пробы № 15 при

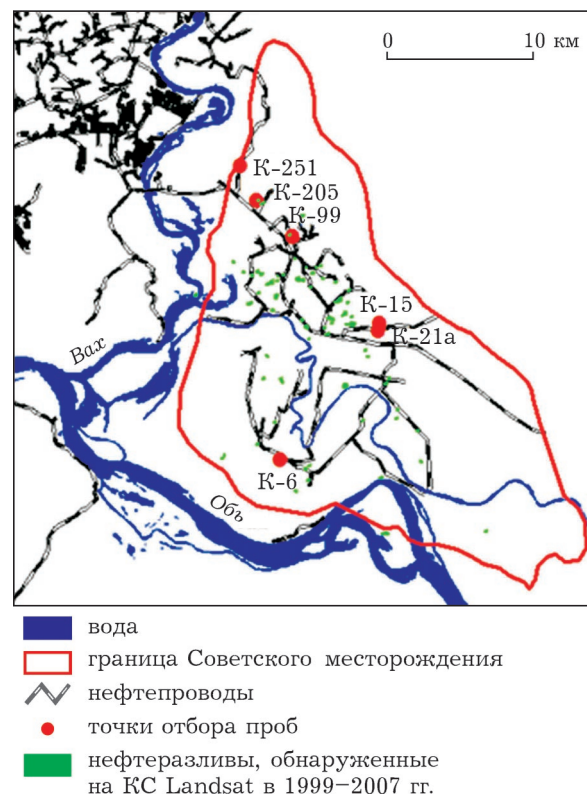


Рис. 2. Карта-схема Советского месторождения с обозначенными нефтеразливами, пунктами отбора проб и схемой нефтепроводов.

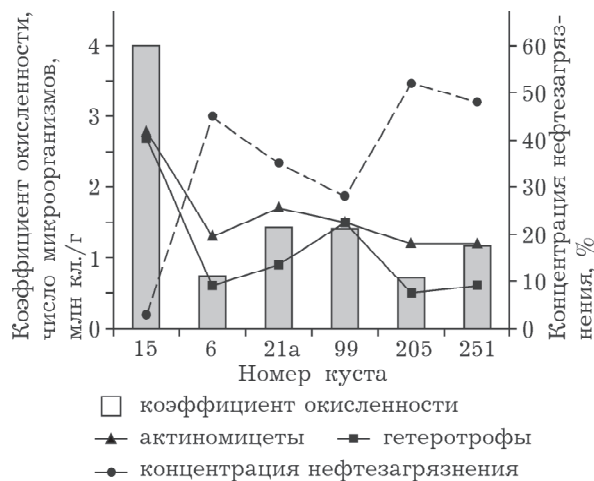


Рис. 3. Коэффициент окисленности, численность микроорганизмов и концентрация нефтезагрязнения проб почвы, отобранных на территории Советского месторождения.

концентрации загрязнителя нефтепродуктами 2.8 % определен высокий коэффициент окисленности, равный 4, и максимальная численность микрофлоры. Это указывает на активные процессы биодеструкции углеводородов в почве (см. рис. 3). В остальных пробах (№ 21а и 99) при концентрации загрязнения 28–35 % значение коэффициента окисленности не превышает 1.4, что свидетельствует о низкой ферментативной активности почвенного биоценоза. Высокая концентрация загрязнения почвы нефтью ингибирует численность и ферментативную активность микроорганизмов. При этом процессы биодеструкции в условиях внешней среды протекают медленно, и для восстановления почвы в естественных условиях

потребуется десятки лет. Экологические возможности микробных сообществ загрязненных почв и водных экосистем на территории севера Томской области весьма ограничены вследствие короткого летнего периода и температурного режима.

На обводненной болотистой местности при аварийных ситуациях на нефтепроводе загрязнение охватывает значительные площади из-за малой пересеченности рельефа, небольших уклонов профиля труб и больших расстояний между линейными задвижками (от 20 до 30 км). Примерная зона загрязнения по обе стороны от аварийного нефтепровода варьирует от 200 м для наземного участка до 3 км при переходе через водную преграду.

Данные, полученные дистанционным путем с применением ГИС-технологий, космических снимков и результатов полевых исследований, могут применяться для расчета массы нефтепродуктов, смываемых с загрязненных территорий водосборов рек. При моделировании предполагаемой массы выноса нефтепродуктов по методике, изложенной в работе [14], максимально возможное загрязнение составляет 1 % площади от всей загрязненной территории месторождения.

В табл. 2 приведены данные по модулю смыва  $\mu$ , среднегодовой и общей массе выноса нефтепродуктов  $V$  с нефтезагрязненных участков водосборного бассейна протоки Посал на территории Советского месторождения. Здесь же указаны значения  $\mu$  и  $V$ , полученные различным способом: 1) при обработке космоснимков (1999 г.); 2) рассчитанные

ТАБЛИЦА 2

Значения модуля смыва  $\mu$  и массы выноса нефтепродуктов  $V$  в бассейне протоки Посал (площадь водосбора 731.85 км<sup>2</sup>, фоновое содержание нефтепродуктов  $a_{\text{ф}} = 0.05$  мг/дм<sup>3</sup>)

Способ получения данных	$f_z$ , км <sup>2</sup>		$\mu$ , мг/(с · км <sup>2</sup> )		$V$ , т		$C_n$ , мг/дм <sup>3</sup>	
	км <sup>2</sup>	% от площади водосбора	Весенний период	Год	Весенний период	Год	Весенний период	Год
Обработка космоснимков Landsat и ASTER GDEM, 1999 г.	0.26	0.04	0.42	0.65	3.2	4.9	0.05	0.05
Расчетные данные*	3.55	0.5	0.9	1.4	7.0	10.7	0.06	0.06
Наземные данные, 2012 г.	0.028	0.004	0.3	0.5	1.4	3.1	0.05	0.05

Примечание. Здесь и в табл. 3:  $f_z$  – площадь нефтезагрязненных земель,  $V$  – среднегодовая и общая масса выноса нефтепродуктов,  $C_n$  – концентрация нефтепродуктов.

\*Прогноз при максимально возможном нефтяном загрязнении (1 % от всей площади загрязнения месторождения).

ТАБЛИЦА 3

Общегодовое значение модуля  $\mu$  и массы смыва нефтепродуктов  $V$  при максимально возможном нефтезагрязнении (1 %) территории Фестивального и Майского месторождений (Томская обл.).  $a_{\text{ф}} = 0.05 \text{ мг/дм}^3$

Бассейн реки	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	$f_z$ км <sup>2</sup>			$V$ , т
			$\mu$ , мг/(с · км <sup>2</sup> )	% от площади водосбора	
Ай-Кагал	351.6	0.4	0.1	0.3	1.7
Елизаровка	237.6	0.7	0.3	0.4	1.3

Примечание. Обозн. см. табл. 2.

с применением метода моделирования предполагаемой массы выноса нефтепродуктов при максимально возможном загрязнении площади месторождения; 3) из данных наземных исследований (2012 г.). Согласно [18], годовой вынос нефти с каждого малого водосбора, в пределах которого расположены нефтедобывающие объекты, составляет примерно 3.0–5.6 т/год. По нашим расчетам, среднегодовой вынос нефтепродуктов в протоку Посал в 1999 г. составил 4.9 т, из них 3.2 т – в весенний период. При моделировании максимально возможного нефтяного загрязнения ежегодный сток нефтепродуктов может достигать в среднем 10.7 т (из них 7 т – в весенний период), а по данным лабораторных исследований – 3.1 т (см. табл. 2). Следовательно, среднегодовой смыв нефтепродуктов в протоку Посал (пойма р. Оби) может изменяться от 3–5 до 10.7 т.

Для малых рек Ай-Кагал и Елизаровки (притоков р. Васюган), протекающих в границах “молодых” месторождений (Майское и Фестивальное), рассчитаны прогнозируемые модули смыва и среднегодовая масса выноса нефтепродуктов (табл. 3). Видно, что при максимально возможном загрязнении водосборной территории малых рек площади составляют 0.4 и 0.7 км<sup>2</sup> соответственно. Среднегодовая масса выноса нефтепродуктов в р. Ай-Кагал может составить 1.7 т, в р. Елизаровке – 1.3 т. Таким образом, модуль смыва и среднегодовая масса смыва нефтепродуктов в реки находятся в прямой зависимости от площади водосбора и концентрации загрязнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты оценки экологического состояния водных объектов Средней Оби показав-

ли, что основными загрязнителями речной системы Томской области являются нефть и нефтепродукты, нитраты, сульфаты и хлориды. Концентрация загрязняющих нефтепродуктов превышает ПДК в 2–6 раз.

Полевые физико-химические и микробиологические исследования на территории Советского месторождения указывают на высокую концентрацию (35–52 %) загрязнения почвы нефтью, которая ингибирует численность и деструктивную активность микрофлоры. Для естественной рекультивации загрязненных почв северных районов Томской области потребуются десятки лет.

Спутниковые данные и геоинформационные технологии перспективно использовать в целях картографирования зон разливов нефти на территории водосбора рек, определения мест риска загрязнения и прогнозирования массы смыва нефтепродуктов с водосборных территорий в реки.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 13-05-98080-р\_Сибирь\_a и проекта НИР V.46.5.5, выполняемого в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований (ФНИ) на 2013–2020 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтунина Л. К., Сваровская Л. И., Полищук Ю. М., Токарева О. С. // Нефтехимия. 2011. Т. 51, № 5. С. 387–391.
- Сваровская Л. И., Яценко И. Г., Алтунина Л. К. // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 332–335.
- Калинин В. М., Соромотин А. В. // Обзор “О состоянии окружающей природной среды Ханты-Мансийского округа в 1998 г.”. Ханты-Мансийск: ГУИПП “Полиграфист”, 1999. С. 18–20.
- Калинин В. М. // Водн. хоз-во России. 2001. Т. 3, № 4. С. 384–393.
- Воробьев Д. С., Попков В. К. // Изв. Том. политех. ун-та. 2005. Т. 308, № 4. С. 48–50.
- Дюкарев А. Г., Львов Ю. А., Хмелев А. А., Пологова Н. Н., Лапшина Е. Д. Природные ресурсы Томской области. Новосибирск: Наука, 1991. 176 с.

- 7 Полищук Ю. М., Березин А. Е., Дюкарев А. Е., Козин Е. С., Токарева О. С. // Экология пойм сибирских рек и Арктики: Тр. II совещания, 22–26 ноября 2000. Томск: STT, 2000. 392 с.
- 8 Белицкая Е. А., Гузньева М. Ю., Кадычагов П. Б., Русских И. В., Туров Ю. П. // Экология пойм сибирских рек и Арктики / под ред. В. В. Зуева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. С. 122–130.
- 9 Ященко И. Г., Перемитина Т. О., Лучкова С. В. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 4. С. 5–9.
- 10 Другов Ю. С., Родин А. А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. Практическое руководство. М.: Бином, 2007. 270 с.
- 11 Звягинцев Д. Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: МГУ, 1991. С. 231.
- 12 Симонова Н. Л. Комплексный анализ формирования и прогноз загрязнения речных вод в бассейне Средней и Нижней Оби: Дис. ... канд. геогр. наук. Екатеринбург, 2006. 174 с.
- 13 ArcHydro Tools. USA: ESRI, 2011. 184 с.
- 14 Хорошавин В. Ю. // Вестн. Тюм. гос. ун-та. 2010. № 7. С. 153–161.
- 15 Коняшкин В. А., Немцова М. О., Кудрявцева Ю. Н. // Экологический мониторинг. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2012 г. Томск: Дельтаплан, 2013. С. 128–144.
- 16 Margesin R., Schinner F. // Appl. Environ. Microbiol. 2001. Vol. 67. P. 3127–3133.
- 17 Greenword P. F., Wibrow S., George S. J., Tibbett M. // Organ. Geochem. 2009. Vol. 40. P. 293–300.
- 18 Савичев О. Г. Реки Томской области: состояние, охрана и использование. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 170 с.