

## Оценка экологического риска сжигания попутного нефтяного газа в Западной Сибири

И.Г. Яценко, Л.И. Сваровская, М.Н. Алексеева\*

*Институт химии нефти СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 4*

Поступила в редакцию 21.01.2014 г.

Опасным фактором негативного воздействия нефтедобывающего комплекса на экологию Западной Сибири является химическое загрязнение атмосферы при сжигании попутного нефтяного газа в факелах. На основе тепловых космических снимков Landsat и продуктов MODIS разработана методика построения карт тепловых аномалий и экологического риска поражения растительных сообществ на территории сжигания попутного нефтяного газа в факелах. Нами рассмотрено применение тепловых космических снимков Landsat и продуктов MODIS для экологического мониторинга антропогенного воздействия на растительность территорий нефтяных месторождений в Западной Сибири – Ватинское, Самотлорское (Ханты-Мансийский автономный округ) и Советское (Томская область).

*Ключевые слова:* попутный нефтяной газ, загрязнение атмосферы, космоснимки, экологический риск, факел, цифровые карты, месторождение; associated oil gas, atmospheric pollution, satellite images, ecological risk, flare, numerical maps, oil field.

Анализ факторов негативного воздействия на экологию внешней среды показал особую опасность факельного сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ), вокруг которого формируются обширные шлейфы аэрозольного загрязнения. По России объем сжигания нефтяного газа в факелах в 2012 г. составил 17,1 млрд м<sup>3</sup>, больше всего сжигается ПНГ в Восточной Сибири и Ханты-Мансийском автономном округе (АО) – суммарно почти 70% от всего объема факельного сжигания ПНГ в стране [1]. Переработка ПНГ для производства продукции газонефтехимии является наиболее рациональным способом его использования. В связи со сжиганием попутного нефтяного газа на факелах наша страна ежегодно теряет более 12 млн т ценного сырья, а потери в экономике могут составлять более 24 млрд долл. Уровень факельного сжигания по стране и отдельными компаниями должен снизиться в связи с принятием в 2012 г. Постановления Правительства № 1148, согласно которому нефтедобывающие компании обязаны платить высокие штрафы за сверхнормативное сжигание – свыше 5%-го уровня.

При сжигании ПНГ образуются сажа, оксиды азота, монооксид углерода, бенз(а)пирен, «проскочившие углеводороды», бензол, фосген, толуол, тяжелые металлы (ртуть, мышьяк, хром), сернистый ангидрид, иногда сероводород, сероуглерод, меркаптаны. Вследствие сжигания ПНГ выбросы углекислого газа, являющегося парниковым газом,

в России в 2011 г. составили около 90 млн т, а совокупная площадь нарушенных почв от воздействия выбросов горящих факелов приблизительно оценивается в 100 тыс. га. Старые ведомственные подходы к природопользованию не состоятельны, так как привели к экологическому кризису и появлению мировой проблемы защиты окружающей среды. Особую важность при анализе воздействия загрязнений приобретает картографическое обеспечение задач экологического прогнозирования [1].

Негативные последствия от сжигания ПНГ для экосистем включают: сокращение лесных территорий, захламенение выделенных площадей, повышение уровня пожароопасности лесов; механическое, химическое и термическое повреждение растительности и почвенного покрова; снижение численности и видового разнообразия животных, насекомых и микроорганизмов; обеднение видового состава подроста, кустарникового, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов территорий.

Известно, что Западная Сибирь является основным нефтегазодобывающим регионом России. Так, в 2012 г. в Ханты-Мансийском АО извлечение ПНГ составило 35,8 млрд м<sup>3</sup>, а объем его использования достиг порядка 32 млрд м<sup>3</sup>, или 89,1% от общего объема извлечения. В Томской области ситуация по утилизации ПНГ выглядит значительно хуже – в 2013 г. средний уровень утилизации в регионе достиг 76%, что обуславливает высокие риски для окружающей среды области [2–6]. Цели данной работы – картографирование тепловых аномалий (факелы, пожары, гари) нефтедобываю-

\* Ирина Германовна Яценко (scir@ipc.tsc.ru); Лидия Ивановна Сваровская (sli@ipc.tsc.ru); Мария Николаевна Алексеева (amn@ipc.tsc.ru).

щих территорий на основе спутниковых данных и оценка экологического риска воздействия химического загрязнения атмосферы, возникающего при сжигании попутного газа в факелах, на растительный покров нефтедобывающих территорий Западной Сибири.

Космические снимки (КС) позволяют не только обновлять топографические, геологические, метеорологические, гидрогеологические, почвенные, геоботанические и т.д. карты, но и оценивать экологическую ситуацию регионов [7, 8]. Для каждого типа карт имеется своя методика их составления по КС, использующая в определенном сочетании рисунок снимка и значения яркости в каждой его точке (соответствующие спектральной отражательной способности поверхности). В наших исследованиях – это растительный покров поверхности и ее температура. Коллекция используемых КС на территории Ханты-Мансийского АО и Томской области приведена в табл. 1.

Автоматизированное дешифрирование фрагмента КС в районах Западной Сибири позволяет значительно детализировать контуры болот различного типа, ареалы распространения групп растительности, контуры пожарищ, гарей, участки и точки тепловых аномалий поверхности.

На рис. 1–3 (вклейки) приведены фрагменты космических снимков Самоглорского, Советского нефтяных месторождений и северной части территории Томской области с идентификацией объектов по видам растительности.

В настоящее время тепловые КС используются для изучения тепловых полей поверхности ландшафтов в условиях антропогенного воздействия. Нами рассмотрено применение тепловых КС Landsat и продуктов MODIS (MOD11A1 – температура поверхности Земли, MOD14A1 – данные по тепловым аномалиям) для экологического мониторинга антропогенного воздействия на территории нефтяных месторождений Ватинское, Самоглорское и Советское.

Таблица 1

Коллекция используемых космических снимков

Тип снимков, размер пикселя	Система разграфки	Дата съемки
Landsat ETM, 15–30 м	155/017	19.09.1999 г.
Landsat ETM, 15–30 м	154/017	12.07.2000
Landsat ETM, 15–30 м	154/018	12.07.2000
Landsat ETM, 15–30 м	157/018	14.05.2000
Landsat ETM, 15–30 м	157/018	03.10.2005
Landsat ETM, 15–30 м	154/017	22.06.2007
Landsat TM, 30 м	157/018	13.07.2007
Landsat TM, 30 м	155/017	15.07.2007
TERRA ASTER GDEM, 30 м	N60E072, N60E073, N60E077, N60E078, N60E079, N60E080, N60E081, N60E082, N60E083, N60E080	Многолетний период
TERRA/ MODIS, 250–1000 м и программные продукты:		
MOD11A1	21/02	16.07.2000
MOD11A1	21/02	18.07.2000
MOD11A1	21/02	16.07.2001
MOD11A1	21/02	28.07.2001
MOD11A1	21/02	09.05.2007
MOD14A1	21/02	12.07.2007
MOD11A1	21/02	16.07.2007
MOD11A1	21/02	25.07.2007
MOD14A1	21/02	12.07.2010
MOD11A1	21/02	17.07.2012
MOD13Q1	21/02	24.05.2000
MOD13Q1	21/02	27.07.2000
MOD13Q1	21/02	13.09.2000
MOD13Q1	21/02	14.09.2000
MOD13Q1	21/02	25.05.2001
MOD13Q1	21/02	28.07.2001
MOD13Q1	21/02	25.05.2007
MOD13Q1	21/02	28.07.2007
MOD13Q1	21/02	14.09.2007
MOD13Q1	21/02	24.05.2012
MOD13Q1	21/02	27.07.2012
MOD13Q1	21/02	13.09.2012
MCD12Q1	21/03	2009
MCD12Q1	22/03	2009
Shuttle Sir-C и X-SAR, 90 м	N57E074, N57E075, N57E076, N57E077, N57E078, N57E079, N57E080, N58E075, N58E076, N58E077, N58E078, N58E079, N58E080, N59E075, N59E076, N59E077, N59E078, N59E079, N59E080, N59E081, N59E082, N59E083, N59E084	Февраль 2000

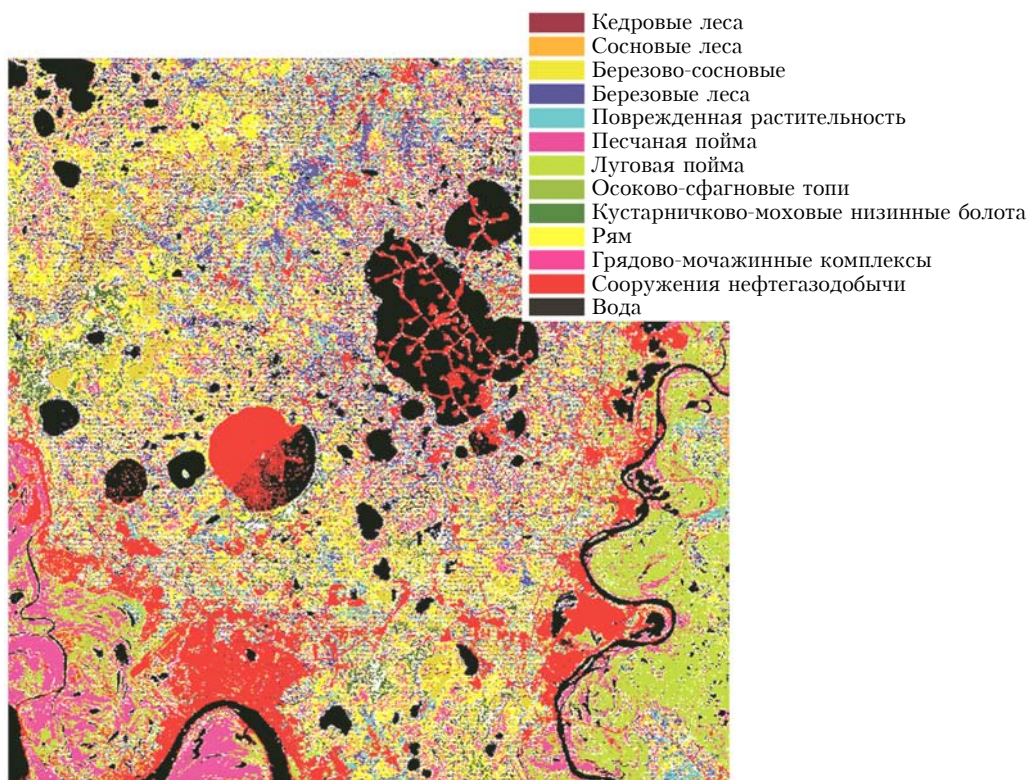


Рис. 1. Космический снимок Самотлорского месторождения Ханты-Мансийского АО

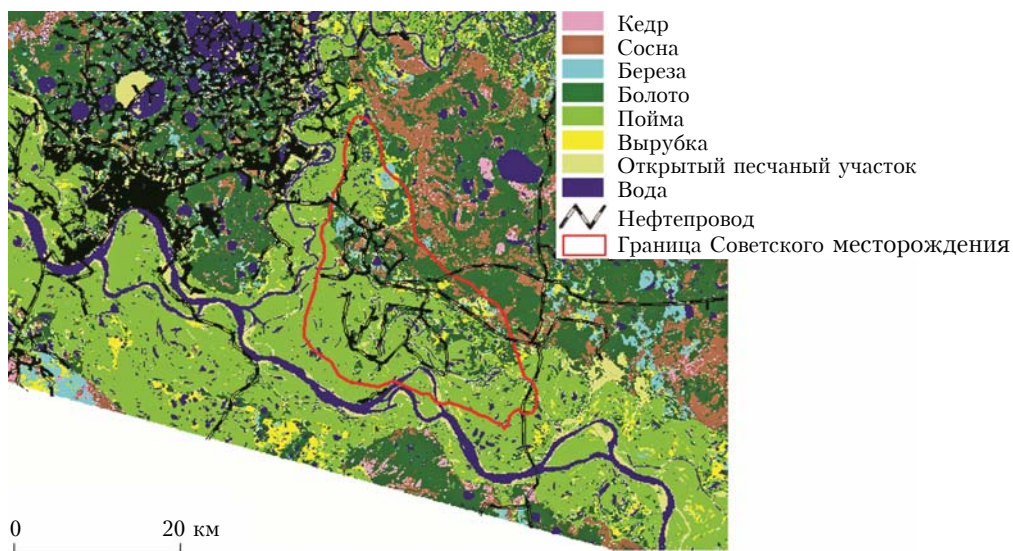


Рис. 2. Космический снимок Советского месторождения Томской области



Рис. 3. Карта растительного покрова бассейна реки Васюган Томской области с границами месторождений углеводородов

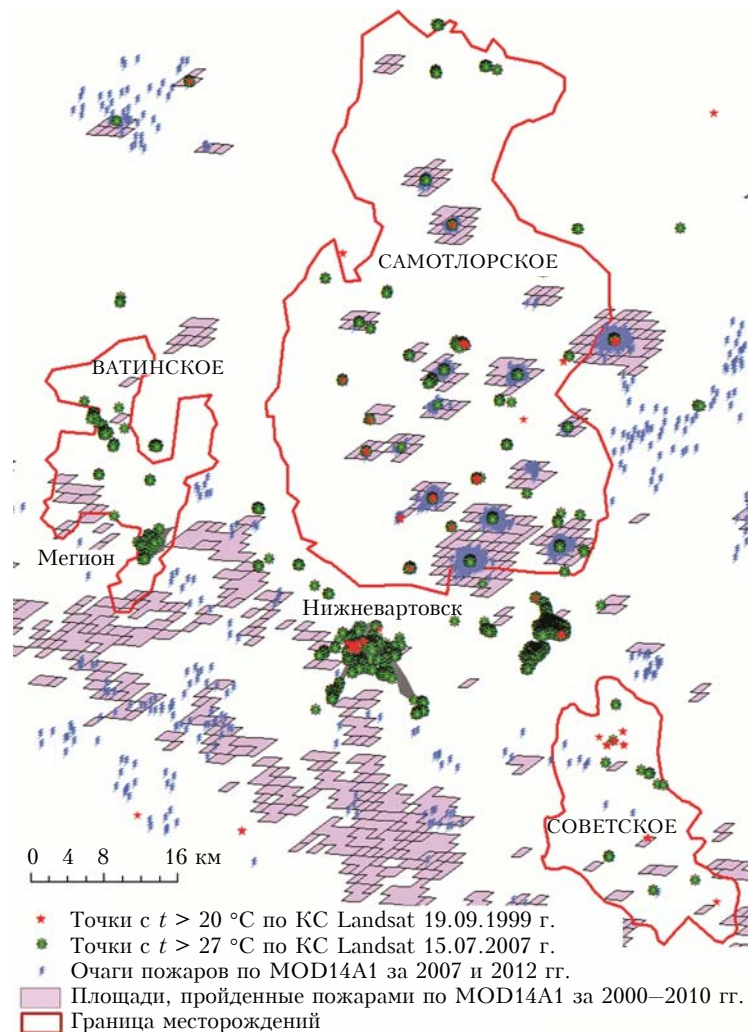


Рис. 4. Участки и точки с аномальными значениями температуры поверхности территории нефтяных месторождений



Авторами статей [8, 9] выявлено, что результаты обработки данных MOD14A1 почти вдвое ниже по сравнению с результатами обработки данных NOAA, особенно при раннем обнаружении малоразмерных очагов пожаров низкой интенсивности. Так, при детектировании факельных установок в Томской области результат их обнаружений по данным MOD14A1 составляет 6 единиц, по их модифицированному алгоритму MOD14 – 21 факельная установка и 53 по результатам обработки данных RTM-методом. В нашем случае продукт MOD14A1 для обнаружения высокотемпературных участков – пожаров и факелов – имеет незначительную точность, но она повышается с использованием KC Landsat путем наложения карт очагов пожаров, городской застройки и факелов на продукт MOD14A1 в ArcGIS.

Для выделения высокотемпературных участков на KC Landsat в среде ERDAS Imagine проводились: 1) пересчет исходных значений пикселей в реальные значения приходящего излучения на сенсоре; 2) пересчет значений излучения на сенсоре в значения температуры; 3) выявление участков с температурой выше порогового значения на основе температуры воздуха приземного слоя, которая в сентябре 1999 г. составляла +17 °С, в июле 2007 г. – +21 °С [9].

Продукты MOD14A1 группы «Тепловые аномалии/пожары» (Thermal Anomalies/Fire) позволяют обнаружить среднеразмерные очаги с высокой интенсивностью горения. Принцип детектирования пожаров основан на их сильном излучении в среднем инфракрасном диапазоне [9].

Применительно к продукту MOD11A1 проводилась конвертация исходных значений пикселей в значения температуры и из формата .hdf в .tif, из синусоидальной проекции в географическую.

На основе преобразований было выполнено детектирование участков с высокими значениями температуры поверхности территорий нефтяных месторождений (рис. 4, вклейка). Высокие значения температуры по KC Landsat отмечены на территории с городской застройкой и участках с факельными установками. Так, по данным KC Landsat 19.09.1999 г. высокие температуры поверхности изменяются от 20 до 48 °С, по данным KC Landsat 15.07.2007 г. – от 27 до 35 °С. Как следует из рис. 4, точками в виде «звездочек» разного вида отмечены горящие факелы на территории Советского, Самотлорского и Ватинского месторождений. Совмещение этих точек указывает на длительное горение факелов в период 1999–2007 гг.

По данным KC Landsat 2007 г., на Ватинском месторождении выявлено 176 высокотемпературных участков, на Самотлорском – 390, на Советском – 22, в 1999 г. на Ватинском – 0, на Самотлорском – 88, на Советском – 16 высокотемпературных участков. Анализ космоснимков и литературных данных [5–7] свидетельствует об изменении количества действующих факельных установок на рассматриваемых месторождениях с 1999 по 2007 г. В 2012 г., по данным MOD14A1, на территории Самотлорско-

го месторождения численность горящих факелов составила 136, на Советском и Ватинском месторождениях снизилась до 7 и 1 соответственно.

Радиус прямого термического повреждения растительности для факела малой мощности составляет до 50 м, с большей мощностью – до 200 м. Последствия угнетения растительности только за счет теплового излучения наблюдаются на расстоянии до 4 км и более (табл. 2).

Значительное негативное действие на растительность оказывают пожары, риск возникновения которых существенно повышается на нефтедобывающих территориях с действующими факельными установками. По данным MOD14A1, на рис. 4 приведены участки гари 2000–2010 гг. и очаги пожаров за 2007 и 2012 гг. Видно, что на Самотлорском месторождении отмечены большие площади как старых пожаров, так и более современных.

Таблица 2

**Зоны воздействия факельных установок на лесные экосистемы**

Радиус зоны воздействия факела	Зона воздействия	Последствия воздействия
До 200 м	интенсивной нагрузки	Практически полное уничтожение растительности
200 м–1 км	умеренной нагрузки	Уничтожение и деградация растительности, обеднение биоразнообразия
1–4 км	низкой нагрузки	Деградация растительности и накопление продуктов сгорания
4–10 км	остаточного	Проникновение и накопление остатков продуктов сгорания

Основу ПНГ составляет смесь легких углеводородов, включающая метан, этан, пропан, бутан, изобутан и другие углеводороды, которые под давлением растворены в нефти. Состав ПНГ может значительно варьировать в зависимости от территории добычи, а также от свойств конкретного месторождения. Примерный компонентный состав западносибирских месторождений из базы данных Института химии нефти СО РАН по нефти и газу представлен в табл. 3 [10, 11].

Таблица 3

**Состав ПНГ в месторождениях Западной Сибири**

Месторождение	Состав газа, % мас.						
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>12</sub>
Ватинское	0,51	3,09	58,78	12,03	15,75	6,72	3,12
Самотлорское	0,67	3,02	59,53	6,21	15,78	10,54	4,25
Советское	0,48	2,02	57,30	6,10	13,70	18,90	1,50

Разработанная нами методика картографирования экологических рисков в результате воздействия нефтедобывающего комплекса предполагает оценку экологического риска воздействия химического загрязнения атмосферы с учетом чувствительности различных растительных сообществ к загрязнению воздуха [11, 12]. Пространственная структура растительного покрова определялась на основе

дешифрирования космических снимков территории в зоне воздействия факелов. Карты риска негативного воздействия загрязнения атмосферного воздуха строятся путем моделирования рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере с использованием данных из экологических паспортов нефтяных месторождений о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ. В соответствии с рекомендованными Управлением государственной экологической экспертизы Госкомэкологии России строительными нормативами [12] зоной влияния объекта на атмосферный воздух считается территория, на которой загрязнение атмосферы от совокупности источников выброса объекта превышает 0,05 ПДК. В основе разработанной методики оценки экологического риска три градации: пренебрежимый, приемлемый и неприемлемый. Неприемлемым считается риск в зоне загрязнения выше 2 ПДК, приемлемым – от 2 до 1 ПДК, пренебрежимым – в зоне с уровнем загрязнения ниже 1 ПДК.

Основными химическими веществами, выбрасываемыми в атмосферу при сжигании попутного газа в факелах, являются сажа, диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) и диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ). Известно, что некоторые виды растений оказываются более чувствительными к воздействию вредных факторов, чем человек. Таксономические группы растений по степени чувствительности к воздействию фитотоксичных газов располагаются в следующем порядке: мхи, лишайники и грибы; хвойные древесные породы; лиственные древесные породы; травянистые растения. Необходимо отметить, что экологические нормативы качества атмосферного воздуха по химическим свойствам носят рекомендательный характер, определены не для всех загрязняющих веществ, при этом в разных источниках приводятся различные величины ПДК загрязняющих веществ для одного и того же вида растительности.

Чувствительность групп растений определялась на основе анализа экологических нормативов, рекомендуемых сотрудниками Научно-исследовательского института охраны атмосферного воздуха [12]. Для картографирования экологических рисков предложены следующие значения коэффициентов чувствительности: травянистая растительность – 1; мелколиственный лес – 0,75; хвойный лес – 0,5. Чем выше чувствительность, тем меньшие концентрации загрязняющих веществ вызывают повреждения определенных видов растительности. В соответствии с коэффициентом чувствительности для каждой группы растительных сообществ выбираются зоны с определенным уровнем загрязнения атмосферы.

Для лесных комплексов с преобладанием хвойной растительности:

– неприемлемый уровень риска – в зоне с уровнем загрязнения > 1 ПДК;

– приемлемый – в зоне от 1 до 0,5 ПДК;

– пренебрежимый – в зоне от 0,5 до 0,025 ПДК.

Для мелколиственного леса:

– неприемлемый уровень риска – при загрязнении выше 1,5 от ПДК;

– приемлемый – в зоне с уровнем загрязнения от 1,5 до 0,75 от ПДК;

– пренебрежимый – в зоне от 0,75 до 0,0375 ПДК.

Картографирование экологических рисков реализовано средствами геоинформационной системы ArcGIS и состоит из следующих этапов:

1) кластеризация и векторизация мультиспектрального космического снимка, создание тематического векторного слоя пространственной структуры растительного покрова;

2) построение векторных слоев цифровой карты, содержащих зоны с разными уровнями загрязнения атмосферы в долях от ПДК соответствующего загрязняющего вещества для человека;

3) выбор зоны загрязнения атмосферы для каждого типа растительности с уровнями загрязнения в зависимости от чувствительности соответствующего типа растительности;

4) построение итоговой карты зон экологического риска.

Таким образом, рассмотрены негативные последствия сжигания попутного нефтяного газа для экосистемы Западной Сибири и применение тепловых космических снимков Landsat и продуктов MODIS для экологического мониторинга антропогенного воздействия на растительность территорий нефтяных месторождений Западной Сибири. Разработана методика картографирования аномальных тепловых полей поверхности ландшафта для определения местоположения действующих факелов и площадей пожаров.

По анализу космоснимков определено изменение количества действующих факельных установок на рассматриваемых месторождениях с 1999 по 2012 г. По данным MOD14A1, в 2012 г. на территории месторождений численность горящих факелов понизилась: на Самоглорском от 390 до 136, на Советском от 88 до 7, на Ватинском от 176 до 1. Реально видны результаты выполнения постановления Правительства по снижению объемов сжигания ПНГ на месторождениях.

Разработана методика расчета уровня риска антропогенного влияния действующих факелов на растительный покров. Зоны риска разных категорий построены для хвойного и мелколиственного лесных массивов.

Внедрение методов решения экологических задач с помощью данных дистанционного зондирования поднимает защиту окружающей среды на качественно новый уровень. Применение средств геоинформационных технологий позволяет проводить совместный пространственный анализ структуры территории и моделирование загрязнения среды с использованием цифровых карт, что упрощает процедуру оценки комплексных негативных воздействий на окружающую среду и дает возможность оперативно принимать решения по их устранению.

Работа выполнена при финансовой поддержке регионального проекта РФФИ № 13-05-98080 р\*сибирь\_а.

1. Кирюшин П.А., Книжников А.Ю., Кочи К.В., Пузанова Т.А., Уваров С.А. Попутный нефтяной газ в России: «Сжигать нельзя, перерабатывать!»: Аналитический доклад об экономических и экологических издержках

- сжигания попутного нефтяного газа в России. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2013. 88 с.
2. *Дневник погоды* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gismeteo.ru/diary/3974/1999/9/>
  3. *Данные по тепловым аномалиям MOD14A1*, описание и получение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/mod14a1.html>
  4. *Информационный бюллетень «О состоянии окружающей среды Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в 2008–2009 гг.»*. Департамент экологии Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Ханты-Мансийск: ОАО «НПЦ Мониторинг», 2010. 130 с.
  5. *Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2010 г.* Департамент экологии Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Ханты-Мансийск: ОАО «НПЦ Мониторинг», 2011. 125 с.
  6. *Алексеева М.Н., Яценко И.Г., Перемитина Т.О.* Оценка состояния окружающей среды нефтедобывающих территорий на основе данных дистанционного зондирования с применением геоинформационных технологий // *Безопасность жизнедеятельности*. 2013. № 1. С. 30–35.
  7. *Полищук Ю.М., Березин А.Е., Дюкарев А.Г., Козин Е.С., Токарева О.С.* Методические вопросы применения ГИС в задачах оценки и прогноза воздействия нефтедобычи на лесоболотные комплексы Западной Сибири // *Труды 2-го совещания «Экология пойм сибирских рек и Арктики»*. Томск: STT, 2000. С. 314–320.
  8. *Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В.* Физические основы применения RTM-метода в задачах ИК-зондирования земной поверхности из космоса // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. статей*. 2009. Т. 1, вып. 6. С. 23–32.
  9. *Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В.* Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // *Оптика атмосф. и океана*. 2008. Т. 21, № 12. С. 1056–1063.
  10. *Полищук Ю.М., Яценко И.Г.* Физико-химические свойства нефтей: статистический анализ пространственных и временных изменений. Новосибирск: Изд-во СО РАН; филиал «Гео», 2004. 109 с.
  11. *Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Полищук Ю.М., Токарева О.С.* Реабилитация нарушенной природной среды нефтедобывающих территорий // *Нефтехимия*. 2011. Т. 51, № 5. С. 387–391.
  12. *Ерохин Г.Н., Копылов В.Н., Токарева О.С., Полищук Ю.М.* Информационно-космические технологии в задачах экологического анализа воздействий нефтедобычи на природную среду. Новосибирск: Изд-е ГПНТБ СО РАН, 2003. 98 с.

*I.G. Yashchenko, L.I. Svarovskaya, M.N. Alexeeva. Assessment of environmental risk associated with gas flaring in Western Siberia.*

Negative impact of oil production complex on the ecology of Western Siberia is the chemical pollution of the atmosphere from the burning of associated gas flaring. The technique has been developed to construct maps of thermal anomalies and environmental risk of plant communities under the influence of combustion products of associated oil gas in flares, polluting the atmosphere. We have considered the use of thermal satellite images Landsat and MODIS products for environmental monitoring of anthropogenic impact on vegetation areas of oil fields in Western Siberia – Vatinское, Samotlorskoye (Khanty-Mansi Autonomous Area) and Sovetskoye (Tomsk region).