

УДК 504.054

Оценка экологических рисков аварийных разливов нефти с использованием спутниковых данных

М.Н. Алексеева, Т.О. Перемитина, И.Г. Яценко*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (ИХН СО РАН)
634021, г. Томск, пр. Академический, 4*

Поступила в редакцию 28.02.2013 г.

Дана оценка экологических рисков аварийных разливов нефти с использованием спутниковых данных. Представлено применение данных со спутников TERRA и Landsat с 1999 по 2007 г. Используются архивы тематических продуктов TERRA/MODIS (MOD11A1, MOD13Q1) и космических снимков Landsat. Разработан подход с использованием MOD11A1 и архивных погодных данных оценки вероятности атмосферной коррозии нефтепроводов. Приведены графики средних значений NDVI за 2000, 2001, 2007 гг. на механически нарушенных и нефтезагрязненных территориях. Рассчитаны коэффициенты корреляции между данными MOD13Q1 на нефтяных месторождениях и показателями погодных условий.

Ключевые слова: экологический риск, нефтепроводы, нефтеразливы, растительный покров, атмосферная коррозия, космические снимки, вегетационный индекс, погодные условия, геоинформационные программы; environmental risk, pipelines, oil spills, land cover, atmospheric corrosion, satellite images, vegetation index, weather, geographic information program.

Введение

Наиболее обоснованной оценкой воздействия нефтяного загрязнения на природную среду принято считать экологический риск, рассматриваемый как вероятность возникновения неблагоприятных ситуаций в состоянии окружающей среды под воздействием негативных факторов. Понятие риска сочетает в себе вероятность реализации неблагоприятного воздействия и вероятность поражения объектов природной среды в результате этого воздействия.

На территории нефтедобывающих комплексов примерно 3% от всей добытой нефти попадает в окружающую среду и становится источником ее загрязнения. Одним из наиболее опасных факторов воздействия нефтедобывающего комплекса на экологию окружающей среды Западной Сибири является химическое загрязнение территорий в результате аварийных разливов нефти. По данным экспертов, в настоящее время в Западной Сибири загрязнено нефтью около 840 тыс. га почвы, что составляет примерно семикратную территорию г. Москвы. Так, на территории Ханты-Мансийского АО (ХМАО) ежегодные объемы аварийно разливаемой нефти составляют от 50 до 70 тыс. т в основном из магистральных и линейных нефтепроводов [1].

Вследствие обводненности и заболоченности территории Западной Сибири значительная часть неф-

тепроводов проложена на болотах и заболоченных землях. Трубопроводы в таких условиях укладываются, как правило, подземно, т.е. непосредственно в торфяном слое на минеральное основание или в специальной технологической насыпи, создаваемой в пределах болота. В исключительных случаях при соответствующем обосновании может быть применена наземная прокладка по поверхности болота с последующей отсыпкой насыпи или надземная прокладка на опорах [2]. Известно, что при прокладке трубопровода в условиях болот существует риск подтопления и размыва коридора нефтепровода и активизации почвенной и наружной электрохимической коррозии металла. Скорость атмосферной коррозии (разрушение металлов под действием приземного слоя атмосферы) зависит от климатических факторов (влажности и температуры воздуха) и концентрации примесей, загрязняющих атмосферу (оксиды серы, азота, выбросы химического производства). В статье рассмотрены влажная и мокрая атмосферные коррозии [3].

Вследствие наружной коррозии металла, включающей атмосферную, почвенную, биологическую и т.д., происходит 30–35% общего числа отказов магистральных нефтепроводов. Анализ официальных данных по аварийности в системе нефтесбора на территории ХМАО показал, что за последние годы в среднем происходит около 4000 аварий в год. Так, за 2009 г. было зарегистрировано 4797 аварий, из них 2417 на нефтепроводах и 2380 на водоводах. Общая масса загрязняющих веществ, попавших в окружающую среду, составила 5781,4 т, площадь загрязнения 229,6 га. Почвы нефтезагрязнений в основном

* Мария Николаевна Алексеева (amn@ipc.tsc.ru); Татьяна Олеговна Перемитина (peremitinat@mail.ru); Ирина Германовна Яценко (src@ipc.tsc.ru).

содержат углеводороды, хлориды и сульфаты пластовых вод.

Применение космических снимков для оценки экологических рисков аварийных разливов нефти

Понятие риска сочетает в себе вероятность реализации неблагоприятного воздействия и поражения этим воздействием объектов природной среды [4].

Экологический риск – это количественная или качественная оценка экологической опасности неблагоприятных воздействий на природную среду. Таким образом, понятие экологического риска позволяет для широкого класса явлений и процессов дать количественное описание экологических опасностей. Именно это качество оценки риска и представляет интерес для анализа экологических рисков, возникающих при транспортировке нефти. В рамках подхода оценка экологических рисков аварийных разливов нефти с использованием космических снимков (КС) проводилась нами по приведенной схеме (рис. 1).

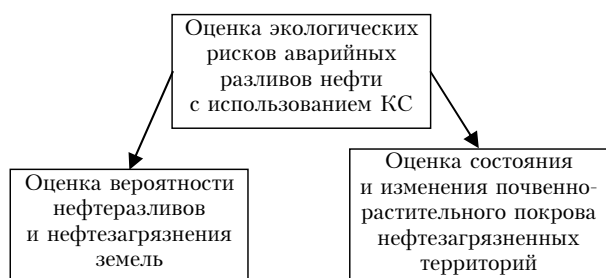


Рис. 1. Схема оценки экологических рисков аварийных разливов нефти с использованием КС

Объектом исследования послужили территории Советского (Томская область), Ватинского, Самолторского и Вахского (ХМАО) нефтяных месторождений. В рамках поставленной цели с использованием КС решались следующие задачи.

1. Оценка вероятности нефтеразливов и нефтезагрязнения земель на основе КС Landsat, архивных данных температуры поверхности Земли и погодных условий.

2. Оценка состояния и изменения растительного покрова на техногенно-нарушенных территориях на основе вегетационного индекса.

В работе нами использовались КС, полученные со спутника TERRA сканером MODIS, архив которых содержит результаты первичной обработки КС и их тематической обработки, и спутника Landsat сканером ETM+. В сети Интернет доступны КС Landsat и тематические продукты MODIS: MOD11A1 – температура поверхности Земли и MOD13Q1 (далее обозначенный в статье NDVI MODIS) – вегетационный индекс за 16-дневный период.

Обработка КС, картографирование территорий и дешифрирование типологических единиц растительного покрова проводились с использованием программного обеспечения ERDAS Imagine, ArcGIS и ArcView.

Расчет вегетационного индекса NDVI основан на особенностях поглощения солнечной радиации в красной области электромагнитного спектра хлорофиллом и отражения ее в инфракрасной области спектра клеточными структурами листа. NDVI рассчитывается по формуле [5]:

$$NDVI = \frac{P_{nir} - P_{red}}{P_{nir} + P_{red}},$$

где P_{nir} и P_{red} – значения яркости пикселя в ближнем инфракрасном и красном диапазонах. Высокая фотосинтетическая активность, связанная с большой фитомассой ненарушенного растительного покрова, имеет низкие значения яркости пикселей в красном диапазоне и большие значения в ближнем инфракрасном диапазоне. Как правило, для густой растительности он составляет 0,7, для разреженной 0,5, для открытой почвы 0,025 и искусственных материалов – 0,5.

Доступные в сети Интернет NDVI MODIS имеют разрешение 250 м на местности и рассчитаны зарубежными специалистами Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC) по данным в спектральных диапазонах (табл. 1), прошедшим атмосферную коррекцию.

Таблица 1

Данные, используемые для расчета NDVI

Спутник/сканер	Канал		Диапазон длин волн, нм		Пространственное разрешение, м
Terra/MODIS	1	2	620–670	841–876	250
Landsat/ETM+	3	4	630–690	760–900	30

Атмосферная коррекция КС Landsat проводилась авторами работы с использованием метода, подробно описанного в [6]. Данный метод основан на преобразовании исходных значений пикселей в спектральную яркость и далее в коэффициенты отражения с учетом влияния атмосферы. В случае высокой облачности на КС Landsat были созданы векторные маски облаков, которые вырезались из растрового изображения.

Также мы использовали из сети Интернет архивы метеорологических наблюдений г. Нижневартовска, содержащие показатели погодных условий, – значения температуры приземного слоя воздуха, относительной влажности и точки росы. В настоящей статье проведены расчеты коэффициентов корреляции между данными дистанционных исследований и показателями погодных условий и приведены графики средних значений NDVI на механически нарушенных и нефтезагрязненных территориях.

Оценка вероятности нефтеразливов и нефтезагрязнения земель

В комбинациях КС Landsat, полученных в определенных каналах электромагнитного спектра, были дешифрованы типологические единицы растительного покрова – моховые и травяные болота, хвойные

и мелколиственные леса, травянисто-кустарничковая растительность пойм, фитоценозы на месте вырубок лесов и повреждений на болотах, открытые участки в местах расположения нефтепроводов, кустовых площадок и антропогенные объекты (трубопроводы, дороги, линии электропередач, буровые площадки, кустовые основания и самое главное – разливы нефти и нефтепродуктов).

На основе дешифрирования КС Landsat 1999–2001 гг. была построена картосхема обводненных болот и водных объектов с сетью промысловых и магистральных нефтепроводов (рис. 2), которая охватывает территории нефтяных месторождений Советское (Томская область), Вахское, Самотлорское и Ватинское (ХМАО).

Как видно из рис. 2, территория исследуемых месторождений насыщена сетью промысловых и магистральных нефтепроводов, проложенных на обводненных болотах. Например, на Самотлорском месторождении площадь болот составила 1026,52 км², Ватинском 121,5, Советском 111,23 и на Вахском 121,51 км², что соответствует 55, 47, 26 и 25% от общей площади месторождения соответственно. На картосхеме обозначена зона влияния возможных нефтеразливов на исследуемой территории, ширина буферной зоны 1 км по обе стороны от линий нефтепроводов.

Далее рассмотрим риск возникновения влажной и мокрой атмосферных коррозий трубопроводов с применением архивных данных температуры поверхности Земли и относительной влажности воздуха и точки росы, полученных из источника [7]. Точка росы определяется относительной влажностью воздуха:

чем выше относительная влажность, тем точка росы выше и ближе к фактической температуре воздуха. Если точка росы воздуха выше, чем температура подложки (в нашем случае поверхность нефтепровода – металл), то на подложке будет иметь место конденсация влаги. В табл. 2 показаны средние и минимальные значения температуры поверхности Земли рассматриваемых месторождений. По MOD11A1, полученному 17.07.2007 г., было определено, что в этот день минимальная температура поверхности Земли в понижениях рельефа исследуемых месторождений составила 16 °С, а температура точки росы 16,7 °С, из чего следует вероятность конденсации влаги на поверхности нефтепроводов и возникновения влажной и мокрой атмосферных коррозий. Действительно, по данным архива погодных условий метеорологических наблюдений в г. Нижневартовске 18.07.2000 в 17 ч относительная влажность воздуха составила 71%.

На основе дешифрирования КС Landsat 1999–2001 гг. было определено, что общие площади нефтяных разливов на территориях Ватинского, Самотлорского, Советского и Вахского нефтяных месторождений составляют 0,5; 11; 0,4 и 0,5 км² соответственно. За последние годы на территории ХМАО отмечается уменьшение площади нефтезагрязненных земель в результате проведенной рекультивации, а также благодаря процессам самовосстановления. Так, в нашей работе [8] установлено, что в результате дешифрирования КС Landsat 2007 г. на территориях вышеперечисленных месторождений площади нефтеразливов составили 0,4; 4,5; 0,3 и 0,2 км²

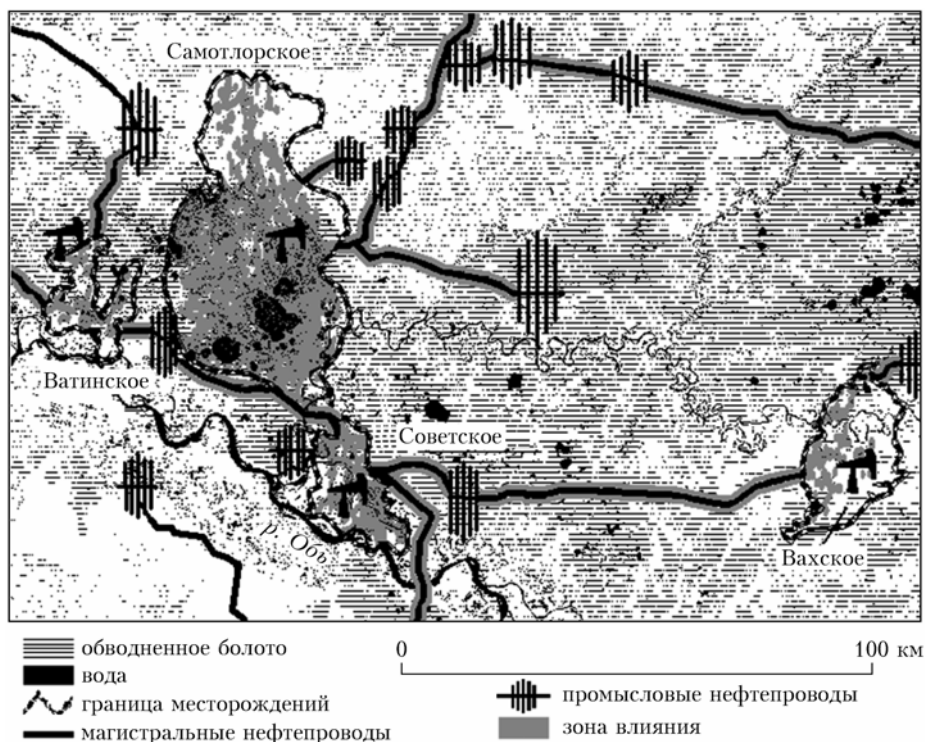


Рис. 2. Картосхема обводненных болот и водных объектов с сетью промысловых и магистральных нефтепроводов

Вероятность атмосферной коррозии нефтепроводов

Параметр погоды	Дата MOD11A1				
	18.07.2000	19.07.2000	15.09.2001	22.06.2007	15.07.2007
Средняя температура поверхности Земли, °С	23	22	14	22	23
Минимальная температура поверхности Земли, °С	16	19	10	18	16
Точка росы, °С	16,7	4,3	-3,3	8,9	10,5
Относительная влажность, %	71	35	31	43	52
Вероятность атмосферной коррозии	есть	нет	нет	нет	нет

соответственно, что меньше площадей нефтеразливов, определенных по КС 1999–2001 гг., примерно в 1–2,5 раза.

Оценка состояния и изменения почвенно-растительного покрова нефтезагрязненных территорий

Оценка состояния и изменения растительного покрова на техногенно-нарушенных участках в результате строительства и эксплуатации объектов нефтедобычи была проведена с использованием NDVI MODIS и NDVI, рассчитанного авторами работы по КС Landsat. На рис. 3 приведены средние значения NDVI MODIS, определенные для типов растительного покрова и механически нарушенных участков.

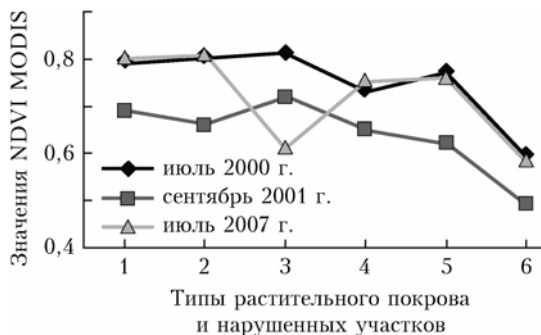


Рис. 3. Средние значения NDVI MODIS типов растительного покрова и механически нарушенных участков: 1 – хвойный лес, 2 – мелколиственный лес, 3 – пойменные экосистемы, 4 – моховые и травяные болота, 5 – вторичная растительность на месте механических нарушений лесов и болот, 6 – техногенные грунты коридоров нефтепроводов

Показано, что наибольшие значения NDVI MODIS рассчитаны для темнохвойных и мелколиственных лесов в июле 2000 и 2007 гг. (0,8), а наименьшие значения NDVI MODIS – для вторичной растительности на месте механических нарушений лесов и болот, которые в сентябре 2001 г. составили 0,4–0,5. Следует отметить, что точность NDVI вторичной растительности на месте механических нарушений лесов и болот и в местах техногенных грунтов составляет 60% вследствие низкого (250 м) разрешения NDVI MODIS.

Как правило, изменение состояния растительности связано с изменением климата. Нами исследована взаимосвязь NDVI MODIS на месторождениях Западной Сибири с погодными условиями за вегетационный сезон. Рассчитан коэффициент корреляции между значениями NDVI MODIS типов растительности и нарушенных участков за 2000, 2001, 2007 гг. с соответствующими значениями температуры и относительной влажности, усредненными за 16-дневный период в соответствии с датами NDVI MODIS (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты парной корреляции между значениями NDVI MODIS и значениями «относительной влажности» и «температурой приземного слоя воздуха» (типы см. в подписи к рис. 3)

Погодные показатели	NDVI MODIS типов растительного покрова и нарушенных участков					
	1	2	3	4	5	6
Относительная влажность, %	0,5	0,5	-0,8	0,6	0,4	0,4
Температура, °С	0,8	0,7	-0,6	0,8	0,7	0,6

NDVI MODIS, за исключением пойменных экосистем остальных дешифрованных типологических единиц растительного покрова и механически нарушенных участков, имеет тесную корреляцию с показателями погодных условий. В июле 2007 г. наблюдалось обводнение поймы р. Оби на Ватинском и Советском месторождениях. Наблюдается положительная корреляция NDVI MODIS с температурой приземного слоя воздуха, где коэффициенты корреляции составляют от 0,6 на нарушенных участках до 0,8 в хвойных лесах и на болотах (см. рис. 3, тип 4). Коэффициенты корреляции NDVI MODIS с относительной влажностью составляют от 0,4 на нарушенных участках. Низкие значения коэффициента корреляции свидетельствуют о меньшей взаимосвязи NDVI MODIS с показателями погодных условий на нарушенных участках по сравнению с ненарушенными участками.

Известно [8], что на месторождениях Западной Сибири значительная часть нефтезагрязнений (от 20 до 60%) приходится на болота, которые характеризуются низкой устойчивостью к механическому воздействию и химическому загрязнению. Остальные площади нефтезагрязнений приходятся на места механических нарушений лесов, болот и техногенных

грунтов коридоров нефтепроводов. Для исследования изменения состояния растительного покрова, поврежденного в результате нефтеразливов, определенных по КС Landsat, были рассчитаны значения индексов NDVI по КС Landsat и усредненные по нефтезагрязненным участкам месторождений за летний период 1999, 2000, 2001 и 2007 гг., также проведено их сравнение с аналогичными значениями NDVI незагрязненных участков.

Из рис. 4 видно, что средние значения NDVI с 2000 по 2007 г. на нефтезагрязненных участках примерно в 1,5–8 раз меньше, чем на аналогичных

незагрязненных (фоновых) территориях для всех типов растительности. Наибольшее отличие средних значений NDVI для фоновых и нефтезагрязненных участков по всем исследуемым типам растительного покрова отмечается в 2000 г. (рис. 4).

Далее, до 2007 г. происходит восстановление растительного покрова с замещением видов растительности. Так, значения вегетационных индексов в 2007 г. на участках с 8-летней давностью нефтезагрязнения составили уже от 0,22 до 0,32, и отличие между NDVI загрязненных территорий и фоновыми значениями NDVI значительно уменьшилось.

Заключение

Рассмотрен подход исследования вероятности нефтеразливов и нефтезагрязнения земель с использованием данных MOD11A1 – температуры поверхности Земли и показателей погодных условий – «точки росы» и «относительной влажности воздуха». Выявлено, что наибольшая вероятность атмосферной коррозии нефтепроводов за летние периоды 2000, 2001, 2007 гг. возникла 18.07.2000 г. Значения NDVI MODIS оказались наибольшими для темнохвойных и мелколиственных лесов в июле 2000 и 2007 гг. и наименьшими значениями для вторичной растительности на месте механических нарушений лесов и болот в сентябре 2001 г. Установлено, что коэффициенты корреляции между показателями погодных условий для механически нарушенных участков более низкие по сравнению с ненарушенными участками, что наглядно характеризует состояние растительного покрова как на нефтезагрязненных территориях, так и на фоновых. На основе NDVI по КС Landsat установлено, что с течением времени на нефтезагрязненных участках происходит восстановление растительного покрова с замещением видов растительности. Так, значения вегетационных индексов в 2007 г. на участках с 8-летней давностью нефтезагрязнения составили от 0,22 до 0,32, что примерно в 1–2 раза меньше фоновых значений NDVI.

Таким образом, предложен подход с использованием дистанционных данных выявления вероятности атмосферной коррозии нефтепроводов, нефтезагрязнения прилегающих участков и оценки состояния и изменения растительного покрова на техногенно-нарушенных территориях Западной Сибири. Данный подход позволил выявить механические и химические нарушения исследуемых территорий и установить восстановительную динамику растительного покрова с течением времени. Результаты проведенных исследований могут быть использованы в мониторинге состояния окружающей природной среды нефтедобывающих районов Западной Сибири с учетом ее особенностей (заболоченность, труднодоступность, отсутствие возможностей проведения наземных исследований).

1. Соромотин А.В. Экологические последствия различных этапов освоения нефтегазовых месторождений в таежной зоне Тюменской области // Сиб. экол. ж. 2011. № 6. С. 813–822.

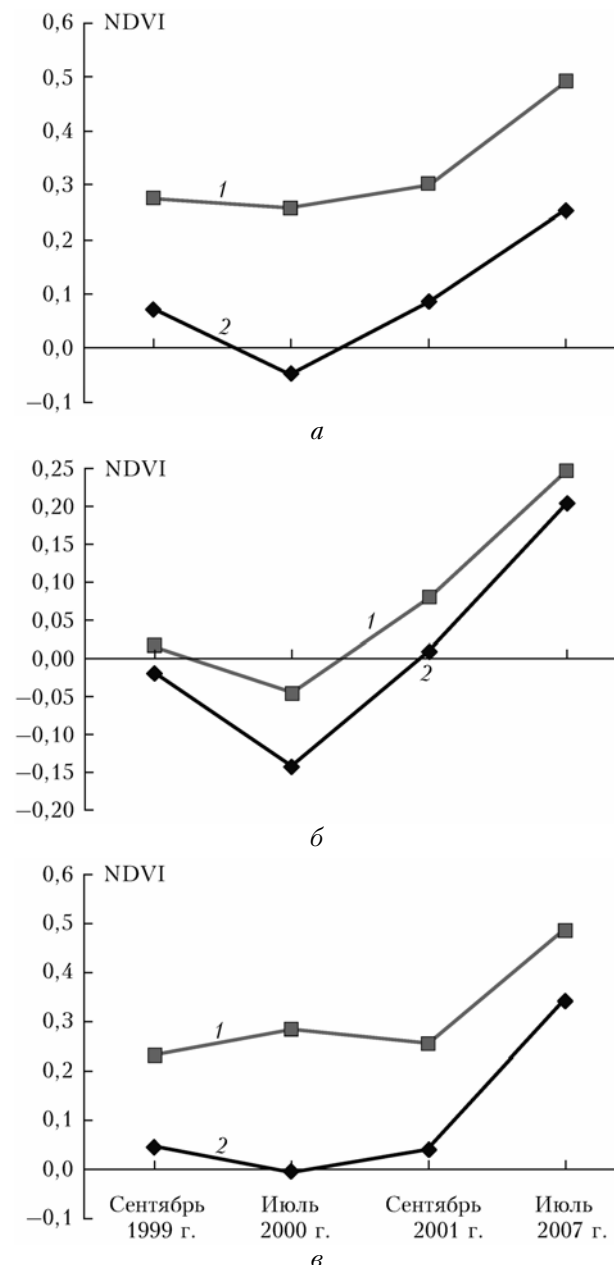


Рис. 4. Усредненные по исследуемым месторождениям значения NDVI, рассчитанные для моховых и травяных болот (а); открытых участков в местах расположения нефтепроводов и кустовых площадок (б); фитоценозов на месте вырубок лесов и повреждений на болотах (в) (1 – фоновые незагрязненные, 2 – нефтезагрязненные участки)

2. ВНС 51-3-85. Проектирование промышленных стальных трубопроводов. М.: Министерство нефтяной промышленности, 1985. 137 с.
3. Атмосферная коррозия [Электронный ресурс]: химическая энциклопедия. Режим доступа: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_chemistry/425, свободный.
4. Осипова Н.А. Техногенные системы и экологический риск. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 112 с.
5. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
6. Skirvin S.M. Notes on COST_ETM7 Atmospheric and Radiometric Correction Script [Электронный ресурс]: программа. 2000. Режим доступа: <http://gis-lab.info/other/atcor.zip>, свободный.
7. Архив погодных условий [Электронный ресурс]: данные. Режим доступа: <http://gp5.ru>, свободный.
8. Алексеева М.Н., Перемитина Т.О., Яценко И.Г. Оценка влияния нефтеразливов на состояние растительного покрова и приземного слоя атмосферы с использованием космических снимков // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 23, № 7. С. 606–610.

M.N. Alekseeva, T.O. Peremitina, I.G. Yashchenko. Estimate of ecological risks of oil spills using satellite data.

The purpose of this paper is to assess the ecological risks of oil spills using satellite data. This paper presents the use of data Landsat and TERRA satellites from 1999 to 2007. We used archives of thematic products TERRA/MODIS (MOD11A1 and MOD13Q1) and Landsat satellite images. The approach, using MOD11A1 and archived weather data for estimate the probability of the atmospheric corrosion of pipelines, was developed. The paper presents a graph of average NDVI values for 2000, 2001, and 2007 on the mechanically disturbed and contaminated territories. The coefficients of correlation between MOD13Q1 in oil fields and indicators of weather conditions were calculated.