

Детектирование тепловых источников в Казахском секторе Каспийского региона по данным NOAA/AVHRR

А.Г. Терехов, Н.Р. Муратова

*Институт Космических Исследований, Министерство Образования и Науки,
Шевченко 15, 050010, Алматы, Республика Казахстан
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

Ежедневный ночной мониторинг территории Западного Казахстана в инфракрасном диапазоне (3-й (3.55-3.93 мкм) и 4-й (10.3-11.3 мкм) каналы NOAA/AVHRR) в течение 2002 года использовался для оценки возможностей контроля за природными и техногенными тепловыми источниками в районах нефтедобычи. Количество регистрируемых источников имело сезонные колебания, доходя в максимуме до 600 очагов в месяц. Разность радиоярких температур между 3 и 4 каналами NOAA/AVHRR, суммированная по всем пикселям тепловой аномалии, рассматривалась в качестве показателя ее условной тепловой мощности. В перспективе, знание тепловой мощности и типов источников открывает возможность оценки объемов эмиссии загрязняющих веществ, выделяющихся при горении.

Введение

Технологические тепловые источники в районах нефтедобычи - неотъемлемая часть современной практики проведения работ. В настоящее время Казахстан присоединился к целому ряду международных соглашений, регламентирующих выбросы вредных веществ. В их числе, например, Рамочная конвенция ООН об изменении климата и Киотский протокол, Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях, Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха и др. Важнейшим условием эффективного регулирования выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ является полная и достоверная информация об их балансе в окружающей среде на территории республики. Спутниковые данные могут значительно улучшить достоверность и прозрачность оценки эмиссионных факторов.

Промышленные тепловые источники

Одной из экологических проблем нефтепромыслов Прикаспия является сжигание продуктов нефтегазового производства. В связи с этим представляет интерес мониторинг тепловых источников в районах нефтяных месторождений (рис.1). Часть источников связана с технологическими особенностями добычи нефти или газа - горение факелов, часть с аварийными ситуациями - горение амбаров при отключении электроэнергии, сжигание разливов нефтепродуктов и т.п. Горящая нефть является источником загрязнения атмосферы, поскольку в процессе ее горения в воздух попадают твердые и газообразные вещества. Среди них диоксид серы, окись азота, различные органические соединения, отрицательно влияющие на состояние окружающей среды и здоровье населения. Инструментально регистрируемое влияние отдельного теплового источника в процессе нефтедобычи может распространяться на сотни километров (рис. 2).

Сопоставление дневной и ночной съемки демонстрирует большую информативность ночной съемки. Распознавание активных тепловых источников эффективнее, когда влияние мешающих факторов минимально [1].

В результате проведения ежедневного космического мониторинга по данным ночной съемки со спутников NOAA, удалось выявить в Западной части Казахстана как стационарные (рис.3), так и периодически возникающие (вероятно аварийные или залповые) техногенные источники горения. По данным спутниковой съемки зафиксированы даты их функционирования, площадные и температурные характеристики.



Рис. 1. Примеры ночных снимков NOAA/AVHRR тепловых источников в районе Прикаспийской нефтедобычи 16,17 декабря 2002 год. Псевдоцветной композит RGB 344

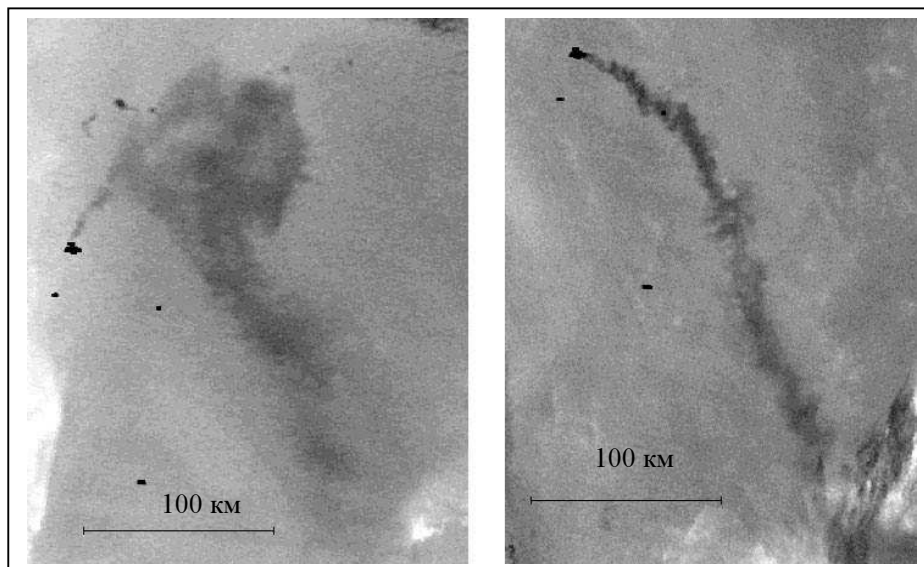


Рис. 2. Примеры техногенных облачных образований в процессе нефтедобычи (район месторождения Тенгиз). Зафиксировано 14,15 января 2002 года по ночным данным NOAA/AVHRR канал 3 (3.55-3.93 мкм)

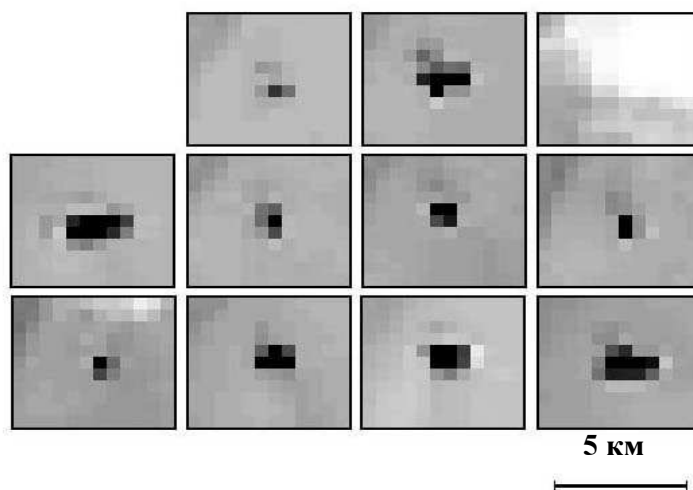


Рис. 3. Фрагмент ежедневного мониторинга постоянного техногенного теплового источника на побережье Каспийского моря. Темный цвет - «горячие» пиксели ночных данных NOAA/AVHRR (разрешение 1 км)

Распознавание тепловых источников

Преобразование тепловой энергии в энергию электромагнитного излучения описывается законом Планка [2]. Он характеризует распределение энергии излучения нагретого объекта по длинам волн в зависимости от температуры. Два основных окна прозрачности обеспечивают прохождение ИК-излучения земной поверхности к приемнику на космической платформе. При возрастании температуры быстро увеличивается мощность суммарного излучения, а длина волны максимального излучения смещается в коротковолновую часть спектра, вплоть до появления видимого излучения при температурах около 1000°C.

Из анализа соотношений между распределением энергии по длинам волн при различных температурах земной поверхности, коэффициентами пропускания атмосферы в окнах прозрачности и спектральной чувствительностью приемников ИК-излучения можно сделать вывод, что при изучении объектов с температурой выше 40°C предпочтительней использование области 3-5 мкм. Если же предметом исследований являются небольшие контрасты на более холодных фонах, например облаках, лучшие результаты получаются при использовании области 8-13 мкм [3]. В работах [1, 2, 4] показано, что наилучшие результаты по выделению «горячих» объектов на поверхности Земли дают данные дистанционного зондирования в холодный период года в ночное время, когда влияние солнечной радиации минимально. Распознавание теплового источника на поверхности Земли основано на регистрации локальной тепловой аномалии с помощью сенсора, расположенного на спутнике. Например, высокая радиометрическая чувствительность сканера AVHRR, установленного на спутнике NOAA, позволяет обнаруживать разницу температур в 0.1°C, что несколько компенсирует его низкую пространственную разрешимость - 1.1 км в надире.

Типичные техногенные тепловые источники, за исключением крупных степных и лесных пожаров, имеют относительно небольшой пространственный размер, как правило, много меньше 1 км. Поэтому, тепловой сигнал с минимально фиксируемого элемента спутникового изображения (пикселя), соответствующего примерно 1 кв. км, практически всегда является составным. На его значение оказывает влияние температуры фона и самого источника. Техногенные источники тепла, в нашем случае горячая нефть, имеют весьма высокие температуры, свыше 1000°C. Соответственно, их вклад в излучение в диапазоне 3,55-3,93 мкм (3-й канал NOAA/AVHRR), будет более значимым, чем в диапазоне 10,3-12,5 мкм (4-й и 5-й каналы NOAA/AVHRR). Это способствует более точному распознаванию высокотемпературных тепловых источников по факту повышенной температуры в 3 канале NOAA/AVHRR.

Обработка ночной спутниковой информации значительно упрощает алгоритм распознавания теплового источника, поскольку мешающее влияние солнечной радиации отсутствует. Принципы обработки спутниковой информации основываются на четырех простых подходах.

Первый подразумевает введение порогового значения радиояркостной температуры в 3-м канале NOAA/AVHRR, превышение которого является признаком тепловой аномалии.

На втором шаге необходимо определить пороговое значение локального градиента температур между соседними пикселями в 3-м канале NOAA/AVHRR для того, чтобы зафиксировать границу тепловой аномалии.

Третий предусматривает анализ разностей радиояркостных температур между 3-м и 4-м каналами NOAA/AVHRR. Эта процедура выделяет участки земной поверхности, у которых температура в 3-м канале аномально выше температуры в 4-м канале.

Важной частью работ является экспертная фотоинтерпретация данных тепловой съемки NOAA/AVHRR.

Тепловая структура подстилающей поверхности в ночное время по данным инфракрасной съемки NOAA/AVHRR, как правило, имеет градиент в несколько десятков градусов. Наиболее теплые – это водные объекты, наиболее холодные – верхние границы облаков. Обычно, между значениями в 3-м и 4-м каналах существует также небольшой (несколько градусов) градиент радиояркостных температур. Использование порогового алгоритма для данных 3-го канала NOAA/AVHRR позволяет уверенно распознавать только самые мощные тепловые источники, значительно отличающиеся по температуре от фона и имеющие наиболее высокие температуры на снимке. Поскольку на поверхности Земли на ночном снимке имеется ряд природных объектов с различной температурой – водные объекты, лед, облака, туманы, растительность, голая почва и т.д. - градиент между ними и источником тепла должен быть достаточно велик (от 5 градусов и выше), чтобы источник был теплее, чем любой из природных объектов.

Анализ градиентов 3 канала NOAA/AVHRR позволяет более точно распознавать техногенные источники, поскольку температура фона перестает влиять на процесс идентификации. В отличие от первого подхода источники, имеющие локальный положительный градиент в 2-3 градуса, могут быть распознаны. При этом в абсолютных значениях температура источника может быть ниже, чем температура природных объектов на снимке, например водных объектов.

Анализ разницы между значениями радиояркостных температур в 3-м и 4-м каналах позволяет распознавать источники тепла, имеющие межканальные аномалии температур в 1,5-2 градуса. При этом, пространственный градиент температур в 4-м канале NOAA/AVHRR между ближайшими пикселями может быть совершенно незначительным, менее 0,5°C, т.е. в пределах естественных вариаций температуры подстилающей поверхности.

Таким образом, если стоит задача распознавания слабых источников техногенной природы, например связанных с нефтедобычей, то последний подход представляется наиболее эффективным.

Результаты фотоинтерпретации ночных снимков зависят от опыта эксперта. Лучший результат дает обработка псевдоцветного изображения с цветовой формулой Red-Green-Blue: 344, где 3,4 – каналы NOAA/AVHRR. Определенные сложности возникают при интерпретации в режиме мониторинга. Поскольку необходимо приводить множество снимков к единому балансу цветов и их насыщенности, для того чтобы одному и тому же цвету на разных снимках соответствовали близкие по природе объекты.

Мониторинг тепловых источников

Мониторинг тепловых источников в зонах нефтедобычи основан на данных ночной съемки NOAA/AVHRR. Отсутствие солнечного излучения и связанного с ним неравномерного нагрева поверхности Земли, зависящего от величин коэффициентов отражения, влажности, теплопроводности грунта, значительно упрощает обработку данных и распознавание тепловых источников.

Технология учета месячной статистики тепловых источников основана на двух параметрах – числе отдельных очагов и их суммарной площади. За месяц накапливаются «горячие» пиксели и формируется мозаика пожаров. Под числом очагов за месяц понимается количество односвязных областей из «горячих» пикселей, а под их площадью – число «горячих» пикселей, каждый из которых имеет фиксированный размер, например в 0,01 градус.

Проведенный мониторинг тепловых источников в 2002 году базировался на ежедневных ночных снимках NOAA/AVHRR. К сожалению, некоторые дни были пропущены из-за слишком высокого уровня помех. Суммарно обработано 582 космических изображения 3-го и 4-го каналов, что содержит информацию за 291 день. На рисунке 4 показано расположение дешифрованных тепловых источников в Западном регионе Казахстана. Рисунок 5 демонстрирует динамику количества и суммарной площади тепловых источников в 2002 году.

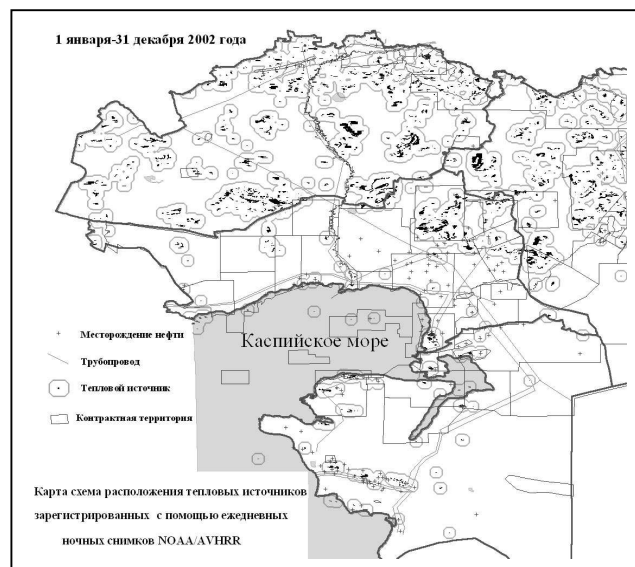


Рис. 4. Расположение дешифрованных тепловых источников Прикаспийских нефтепромыслов и западных областей Казахстана в течение 2002 года по данным ночной съемки NOAA/AVHRR

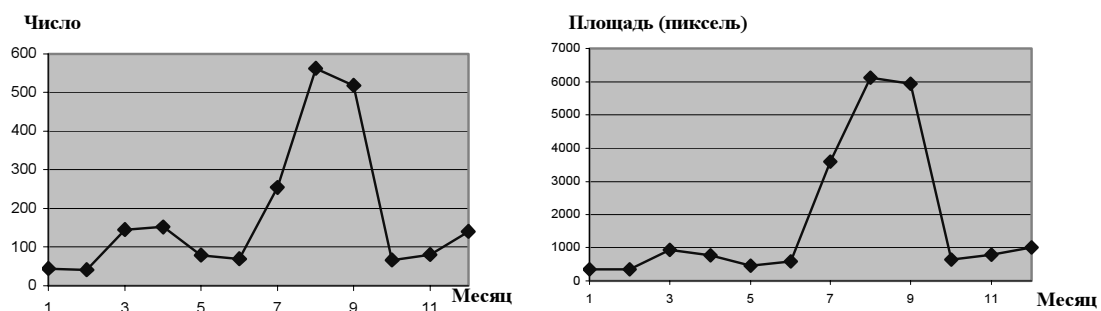
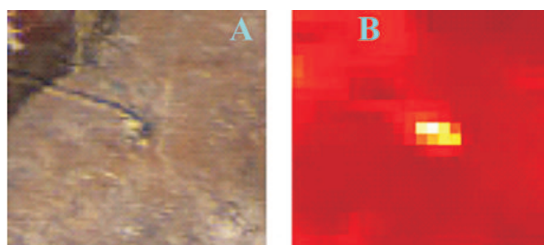


Рис. 5. Месячная динамика числа и площади тепловых источников в прикаспийском регионе ($42^{\circ} - 59^{\circ}$ с.ш. и $46^{\circ} - 57^{\circ}$ в.д.) в 2002 году по ночным данным NOAA/AVHRR (3,4 каналы)

Оценка мощности теплового источника

Количество загрязнений, выделяющихся при горении нефти и нефтепродуктов, определяется количеством сгораемого материала, его химическим составом и условиями горения. Если типы горения и химический состав можно свести к нескольким определенным классам, например: горение газа в факеле, горение нефти, пролитой на поверхность Земли и т.д., то количество сгораемого материала варьируется в очень широких пределах.

Спутниковый мониторинг районов нефтегазодобычи должен решать две основных задачи: обнаружение очагов горения и оценка их тепловой мощности. Излучение поднимающегося столба легкого горячего воздуха, перемешанного с продуктами сгорания, фиксируется сканером через более высокие значения сигнала в инфракрасном диапазоне спектра. Поэтому, даже практически точечные источники, с линейным размером много меньше 1 км, являющиеся источниками горячих газов, регистрируются тепловыми каналами спутниковой системы NOAA/AVHRR с пространственным разрешением 1 км в виде достаточно протяженных зон (рис.6). При этом должна соблюдаться закономерность для однотипных источников: чем большую тепловую мощность имеет точечный источник, тем более протяженная зона температурной аномалии регистрируется на спутнике.



А – тепловой источник в каналах видимого диапазона, MODIS RGB-213 (разрешение 250 м);
В – синхронная съемка в инфракрасной области, MODIS 20 канал (разрешение 1 км).

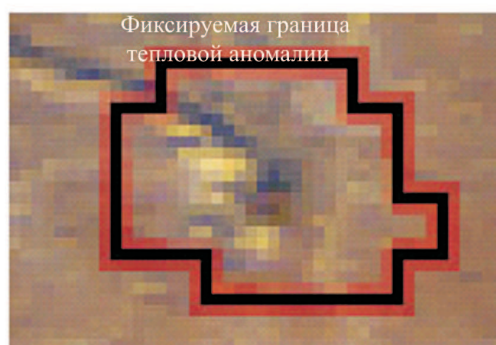


Рис. 6. Дневные данные EOS MODIS для района тестового теплового источника на побережье Каспийского моря за 18 декабря 2002 года

Наличие существенного вклада инфракрасного излучения от газообразных продуктов сгорания формирует зависимость регистрируемой условной мощности источника от метеорологических условий. Направление и скорость ветра в приземном слое, в котором происходит перемешивание и охлаждение продуктов сгорания, будет влиять на площадь и конфигурацию тепловой аномалии. Так, например, на рис.6(в) наиболее горячая зона имеет резко асимметричную форму, с направлением длиной оси совпадающей с направлением дымового следа, т.е. направлением ветра, рис.6(а).

Площадь тепловой аномалии и величина ее температурного градиента относительно фонового значения, наиболее тесно связаны с тепловой мощностью источника. Для оценки тепловой мощности

источника по данным космического мониторинга его параметры целесообразно сводить к одной величине – к сумме градиентов температур (аномалия – фон) по всем пикселям тепловой аномалии.

Процесс горения сопровождается излучением в инфракрасной области с более высокой интенсивностью в ее средней части диапазона: 3-5 мкм (3 канал NOAA/AVHRR, 20-23 каналы MODIS). В дальней ИК области (10-12 мкм, 4,5 каналы NOAA/AVHRR, 28-36 каналы MODIS) источники горения почти не отличаются от фоновых значений. Существует две возможности в измерении температурного градиента теплового источника: первая - измерение градиента температур: аномалия – фон, в третьем канале; вторая – измерение градиента температур, как разницы между радиояркими температурами третьего и четвертого канала.

В первом случае к минусам системы обнаружения можно отнести проблему небольших водных объектов (пруды, озера и др.) и населенных пунктов. В ночных снимках они, как правило, теплее фона и поэтому регистрируются как тепловые источники.

Во втором варианте, использование разницы температур тепловой аномалии между третьим и четвертым каналом в качестве критерия оценки ее мощности, позволяет автоматически выделять только очаги горения, отсеивая другие тепловые источники (водные объекты, населенные пункты и др.). Однако различные метеорологические условия в некоторых случаях формируют небольшой (несколько градусов) градиент радиоярких температур между 3 и 4 каналами NOAA/AVHRR, что требует специальной поправки.

Таким образом, расчет условной мощности источника (P) горения можно производить либо по формуле 1, либо по формуле 2:

$$P = \sum (T_3[\text{источник}] - T_3[\text{фон}]) \quad (1)$$

$$P = \sum ((T_3[\text{источник}] - T_4[\text{источник}]) - (T_3[\text{фон}] - T_4[\text{фон}])) \quad (2)$$

где T_3 - радиояркая температура в 3-м канале NOAA/AVHRR (3.55-3.93 мкм); T_4 – радиояркая температура в 4-м канале NOAA/AVHRR (10.3-11.3 мкм); суммирование проводится по всем пикселям источника.

Тепловая мощность постоянного техногенного источника

Наиболее мощный источник, взятый в качестве тестового, регистрировался на площадке с размером примерно 11х 8 км (рис. 7). На рисунке 8 приведены результаты космического мониторинга в 2002 году условной мощности тестового стационарного теплового источника, рассчитанные по формулам (1) и (2). Принципиально, обе динамики схожи. Некоторое различие в численных значениях не играет особой роли, поскольку расчет реальной мощности должен вестись через среднее в серии наблюдений для того, чтобы отсеять отдельные выбросы, связанные, возможно, с нетипичными погодными условиями. Кроме того, необходимо сопоставление с фактической, достоверно известной тепловой мощностью источника. На рисунке 8 отмечается отчетливая зависимость фиксируемых градиентов от средней температуры поверхности Земли. В холодный период градиенты выше. Этот эффект также должен быть учтен в расчетах фактической тепловой мощностью источников.

Тепловая мощность периодически возникающих источников

Постоянные тепловые источники в районах нефтедобычи обычно связаны с технологическими процессами добычи этих полезных ископаемых. Периодически возникающие источники могут быть вызваны аварийными ситуациями, разведочными работами или другими причинами. Их мониторинг также представляет значительный интерес. На прямоугольной площадке с примерным размером 14х9 км (рис.7) в течение 2002 года отслеживалось возникновение, и оценивалась условная тепловая мощность периодически возникающих источников. Всего в течение 2002 года было зафиксировано 12 случаев появления тепловых аномалий на этой площадке. Время появления и условная расчетная мощность представлены на рисунке 9.



Рис. 7. Карта-схема расположения тестовых территорий

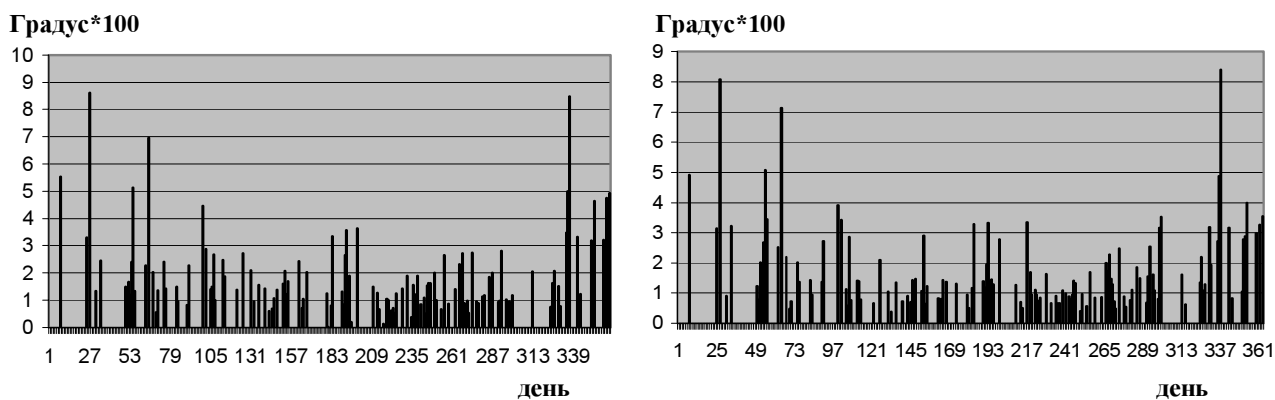


Рис. 8. Результаты мониторинга условной мощности тестового стационарного теплового источника на побережье Каспийского моря в 2002 году, рассчитанные по формуле 1 (слева) и 2 (справа).
Ночная снимка NOAA/AVHRR, 3,4 канал

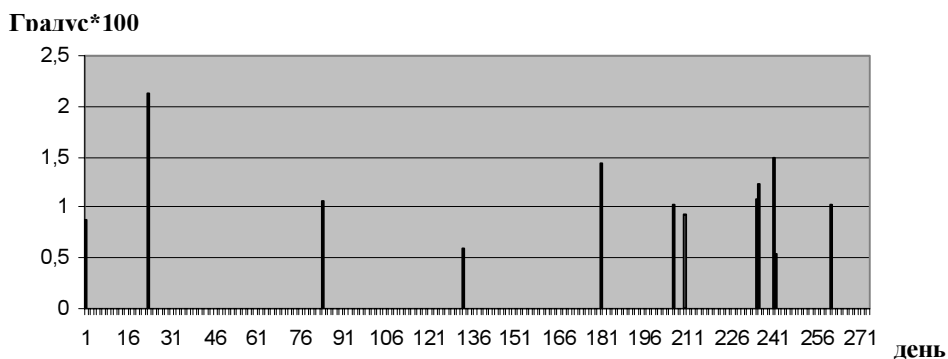


Рис. 9. Результаты мониторинга 2002 года тестовой территории нефтедобычи на побережье Каспийского моря на предмет обнаружения тепловых источников. Ночные данные NOAA/AVHRR 3,4 каналы

Выводы

Спутниковый мониторинг источников тепловых источников в районах нефтедобычи является перспективным инструментом для контроля над их динамикой и оценки эмиссии загрязняющих веществ. Использование данных NOAA/AVHRR и EOS/MODIS позволяет определять количественные параметры тепловых источников: месторасположение, число активных источников, суммарную площадь, условную тепловую мощность. Соответственно, появляется перспектива развития методов оценки объемов сгораемого органического материала, что важно для понимания объемов национальных выбросов различных веществ, попадающих под контроль различных международных соглашений.

На территории Западного Казахстана встречаются два основных типа тепловых источников: степные пожары на пастбищах и сельскохозяйственных полях после уборки урожая и техногенные источники, обычно связанные с добычей и переработкой нефти и газа. Степные пожары имеют ярко выраженную сезонность. Они возникают от неконтролируемых палов, проводимых для очистки сельскохозяйственных угодий от засохшей травы и остатков сеяных культур после их уборки. Техногенные пожары в основном представлены тепловыми источниками, связанными с добычей и переработкой нефти и газа. Особенности режимов горения данных объектов зависят от метеорологической обстановки. Режим ветра, температура воздуха и поверхности Земли влияют на значения характеристик, регистрируемых на спутнике, и соответственно на условную тепловую мощность источника. Все это приводит к необходимости калибровки спутниковой информации на фактические данные о мощности источника и использовании среднегодовых значений при оценке эмиссии загрязняющих веществ.

Литература

1. Организация оперативного спутникового мониторинга территории России в целях службы пожароохраны лесов // М.: ИКИ РАН Пр-1981, 1998. 17 с.
2. *Брамсон М.А.* Инфракрасное излучение нагретых тел // М.: Наука, 1984.
3. *Шилин Б.В., Молодчинин И.А.* Контроль состояния окружающей среды тепловой съемкой // М.: Недра, 1992. 64 с.
4. *Шилин Б.В.* Тепловая съемка при изучении природных ресурсов // Л.: Гидрометеоздат, 1980.