

Использование данных ИСЗ Landsat и модели источника для определения концентрации загрязнителей в шлейфах от продувки газовых скважин

Б.М. Балтер, Д.Б. Балтер, В.В. Егоров, М.В. Стальная

Институт космических исследований РАН
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: Balter@mail.ru

По шлейфам, образованным на снимках Landsat факелами отдувок газовых скважин, определялась концентрация сажи и через нее – расход газа в продувке. Кроме того, определялись параметры атмосферы – скорость ветра, устойчивость – от которых зависит форма шлейфа. Основой служила подгонка к наблюдениям расчетной формы и оптической плотности шлейфа, которые генерировались моделью рассеяния ISC3ST в зависимости от параметров атмосферы и источника выброса. Результаты подгонки достаточно хорошо согласуются с данными предприятия об источнике и метеоусловиях.

Ключевые слова: Landsat, ISC3ST, подгонка, шлейф, отдувка скважин, риск для здоровья.

Введение

При продувке газовых скважин осуществляется выброс газа в виде факела через горизонтальное факельное устройство (ГФУ). При этом сжигаются углеводороды и сероводород газа, что необходимо для снижения концентраций наиболее опасных для здоровья веществ – загрязнителей окружающей среды. Эффективность снижения определяется полнотой сгорания. Контроль полноты сгорания на месте затруднителен, так как факел высокотемпературный и имеет большие размеры. Данная работа ориентирована на оценку опасности для здоровья населения этих источников загрязнения атмосферы по данным, полученным из космических снимков.

На космических снимках территории Астраханского газоконденсатного месторождения, сделанных ИСЗ Landsat, нами было обнаружено несколько крупных (длиной 10 км и более) факелов продувок со значительным поглощением света, свидетельствующим о наличии сажи и неполноте сгорания. Эти образования – одни из наиболее крупных видимых из космоса шлейфов антропогенных загрязнений. Ставилась задача оценить по снимкам количество выбрасываемой сажи, через него – полноту сгорания и далее – количество остаточного наиболее опасного загрязнителя сероводорода. Использовалась разработанная ВНИИГАЗом модель факела ГФУ (геометрия, температура, удельный выброс газовоздушной смеси, концентрации веществ в выбросе) как функция параметров, главными неизвестными из которых были удельный расход газа и полнота сгорания. Определение этих параметров производилось через подгонку модельной формы шлейфа и коэффициента поглощения света в нем к данным космических снимков. Поскольку форма шлейфа зависит также от метеорологических параметров, главными неизвестными из которых являются скорость ветра и показатель устойчивости атмосферы, одновременно происходила под-

гонка и этих параметров. Нам были доступны данные предприятия о реальных параметрах ГФУ и метеоусловиях на момент отдувки. Нами проводилось сравнение восстановленных «вслепую» значений параметров с этими объективными данными.

Обычно для ГФУ, в соответствии с методикой ВНИИГАЗа, выброс сажи принимается нулевым, так как предполагается, что выполнено условие бессажевого горения. Даже если это условие не выполняется, выброс сажи по указанной методике достаточно мал. Однако свидетельства космических снимков дают основание предположить, что значительное поглощение света в шлейфе отдувки обусловлено именно сажевыми аэрозолями. Возможно, присутствие сажи свидетельствует о нарушении принятых методикой ВНИИГАЗа условий горения, что создает неопределенность в величине выброса и других, более токсичных, загрязнителей.

С точки зрения методики интерпретации данных интерес представляет достаточно редко встречающееся сочетание хорошей модели наблюдаемого объекта и космических наблюдений. С точки зрения техники обработки космических данных интерес представляет метод определения оптической плотности и формы шлейфа загрязнений. Для этого использовались смежные по времени снимки Landsat, и по ним интерполировалась спектральная яркость той же территории без шлейфа загрязнений, которая сравнивалась с ситуацией со шлейфом.

Методика обработки космических снимков шлейфа отдувки

В основу работы были положены снимки ИСЗ Landsat-5 и Landsat-7, доступные через Интернет. За период 2002–2010 гг. нами было обнаружено пять крупных шлейфов отдувок. Представлены результаты для отдувок за 24 мая 2002 г. и 20 сентября 2010 г.

Основой для обработки снимка служат 2 параметра шлейфа: его прозрачность (т.е. поглащающая способность) и его форма (упрощенно говоря, угол раскрытия «конуса» шлейфа). Первый параметр позволяет определить концентрацию поглащающего вещества (считается, что это только сажа), но для этого надо знать еще вертикальную толщину шлейфа, которая напрямую не видна на снимке и может быть определена только из модели источника выброса в сочетании с моделью рассеяния выброса. Модель источника разработана ВНИИГАЗом, и ее основной переменной является удельный расход газа, $\text{м}^3/\text{сек}$. Эта переменная должна определяться подгонкой модели к наблюдениям. Другая возможная переменная – коэффициент недожига – либо может предполагаться фиксированной, либо может подгоняться отдельно, вместе с первой переменной. Второй параметр связан с характеристиками рассеяния выброса. Модель рассеяния, использованная нами, – ISC3ST, одна из наиболее популярных и оттестированных моделей в мире. Она требует знания метеопараметров, в первую очередь показателей устойчивости атмосферы и скорости ветра. Эти параметры также были неизвестны, точнее, имелось первое приближение к ним, исходящее из данных достаточно удаленной метеостанции, и требовалась дополнительная подгонка. Основой для нее служила видимая на снимке форма шлейфа, которая весьма чувствительна к указанным параметрам.

Таким образом, производилась одновременная подгонка трех параметров: расхода газа, устойчивости атмосферы и скорости ветра. Это стало возможным потому, что имелось много пространственных точек наблюдения шлейфа и шесть спектральных каналов. Однако для подгонки нужен был «чистый шлейф», т.е. истинный показатель поглощения. Его не так просто определить, поскольку снимок включает атмосферное рассеяние и структуру подстилающей поверхности, видную сквозь шлейф. Спектральная отражательная способность подстилающей поверхности определялась по другим снимкам, где шлейфа нет. Но, поскольку они отделены от обрабатываемого снимка заметным временным интервалом, за это время успевают измениться спектральные свойства растительности. Поэтому требовалась предобработка, включающая следующие операции.

С помощью системы обработки видеинформации ENVI производилась коррекция атмосферы для снимка с отдуvkой и вспомогательных снимков, описанных ниже. Коррекция данных 2002 г. проводилась упрощенным методом QUAC, однако это внесло ошибку в значения яркости, так как метод ориентируется на точки снимка с минимальной яркостью, а таковыми оказываются именно точки шлейфа. Поэтому данные 2010 г. корректировались более тонким методом FLAASH, и он дал вполне удовлетворительные результаты. Отбирались два снимка – один до, другой после даты снимка с отдуvkой. По ним строилась модель временной динамики спектральной отражательной способности поверхности. По этой модели строился интерполированный на дату отдуvки «чистый» снимок, т.е. без шлейфа. Для разных значений подгоняемых параметров источника и атмосферы по модели рассеяния строились варианты шлейфа как пространственного распределения концентрации сажи. На их основе вручную определялась область шлейфа, внутри которой измеряется невязка между моделью снимка со шлейфом (см. ниже) и реальным шлейфом. Выбор этой области критичен для сходимости процесса подгонки параметров как минимизации невязки. Кроме того, выбор этой области играет роль селектора, отделяющего шлейф от тени шлейфа (они плохо различимы на снимке). На основе информации о коэффициенте поглощения сажи (*рис. 1*) по модели концентрации строилась модель коэффициента поглощения шлейфа во всех спектральных диапазонах. Учитывалась вертикальная толщина шлейфа. Имеющаяся информация о коэффициенте поглощения сажи далеко не однозначна, зависит от распределения частиц сажи по размерам и других факторов.

Таким образом, выбор этого коэффициента включает долю субъективности. Пространственное распределение коэффициента поглощения шлейфа накладывалось на «чистый» снимок, и, таким образом, строился модельный аналог реального снимка. Проводилась минимизация невязки между модельным и реальным снимком по подгоняемым параметрам, и определялись оптимальные значения последних. Оптимизация производилась в ограничениях, обусловленных физически вероятными значениями параметров, например расхода газа. Критерием оптимизации был либо усредненный по шлейфу модуль разности модели и наблюдения $|ISC3ST - Landsat|$, либо также усредненный по шлейфу энтропийный критерий: $|Landsat * (ln(Landsat) - ln(ISC3ST))|$. Оптимизированные значения параметров дают концентрации загрязнителей в шлейфе, и можно

рассчитать риск для здоровья населения, если подобный шлейф попадает на обитаемую территорию.

Эта последовательность операций была выработана в ходе работы с данными – сначала за 2002 г., а потом за 2010 г. Поэтому результаты за 2010 г. получены с помощью более тонких методов, чем результаты за 2002 г. В частности, по 2010 г. проводилась селекция используемых для подгонки частей шлейфа и отбрасывалась узкая часть, ближайшая к источнику (так как там система расчетных клеток слишком грубая), и часть с малыми коэффициентами поглощения, так как они менее достоверны. В 2002 г. расход газа и выброс сажи (коэффициент недожига) были раздельными переменными, а для 2010 г. был постулирован коэффициент недожига 10%, так что расход газа и выброс сажи были однозначно связаны и превратились в единую подгоняемую переменную. Кроме того, в качестве критерия подгонки использовался не модуль разности между моделью и наблюдением, а энтропийная характеристика невязки модель-наблюдение, более равномерно чувствительная к частям шлейфа с высоким и низким поглощением.

Оценки концентраций сажи и метеопараметров на снимке 2002 г.

Рисунок 2 показывает результат синтеза «чистого» снимка интерполяцией двух соседних по времени снимков. Сравнение снимка со шлейфом и одного из снимков без шлейфа демонстрируют *рис. 3а* – без коррекции атмосферы и *рис. 3б* – с коррекцией атмосферы. Без коррекции кривые по частям шлейфа, близким к источнику, свидетельствуют о значительном поглощении, которое максимально в 4-ом канале, но мало сказывается в 1–2-ом каналах. Это результат затирающего эффект поглощения воздействия обратного рассеяния атмосферы на коротких волнах. С коррекцией атмосферы поглощение приобрело, как и должно быть, падающий с длиной волны характер (за исключением небольшого остаточного эффекта атмосферы в 1-ом канале).

Рисунок 4 показывает то, что является «наблюдением», сравниваемым с моделью. Это коэффициент поглощения, свой в каждом спектральном канале, в клетках расчетной сетки, накладываемой на шлейф. Он определяется как отношение спектральной яркости по «чистому» снимку, к той же яркости по снимку со шлейфом, минус единица.

Рисунки 5 и 6 показывают два «сечения» модельных данных: первый – при фиксированных параметрах источника и варьируемых метеоусловиях, второй – при фиксированных метеоусловиях и варьируемых параметрах источника. Сильнее всего на вид модельного шлейфа влияют метеоусловия, затем выброс в г/с, а объем газовоздушной смеси м³/с почти не влияет. Можно надеяться определить первый параметр с достаточной точностью, второй – хуже, а третий вряд ли можно определить. Это если, как здесь, второй и третий параметр варьируют независимо; если они связаны, то можно определить и третий параметр. Такая связь имеется, так как и второй, и третий параметры определяются удельным расходом газа, но второй параметр зависит еще от неизвестного коэффициента полноты сгорания. Если зафиксировать этот коэффициент, то можно определить второй и третий параметры совместно. Так делается при обработке данных 2010 г. (см. ниже).

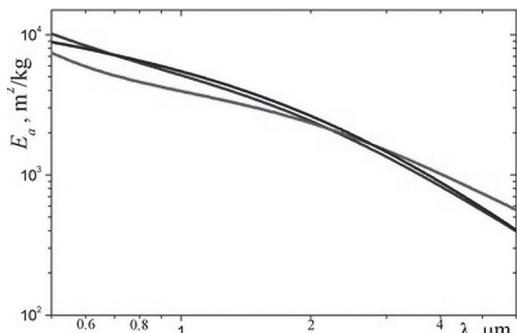


Рис. 1. Коэффициент поглощения частиц сажи, использованный в работе. 3 линии – по 3 разным источникам информации

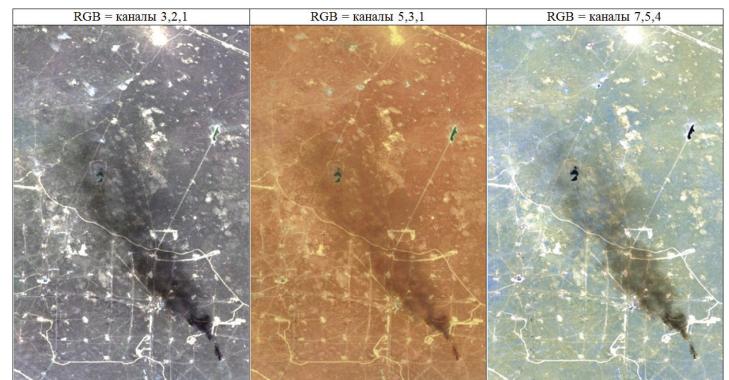
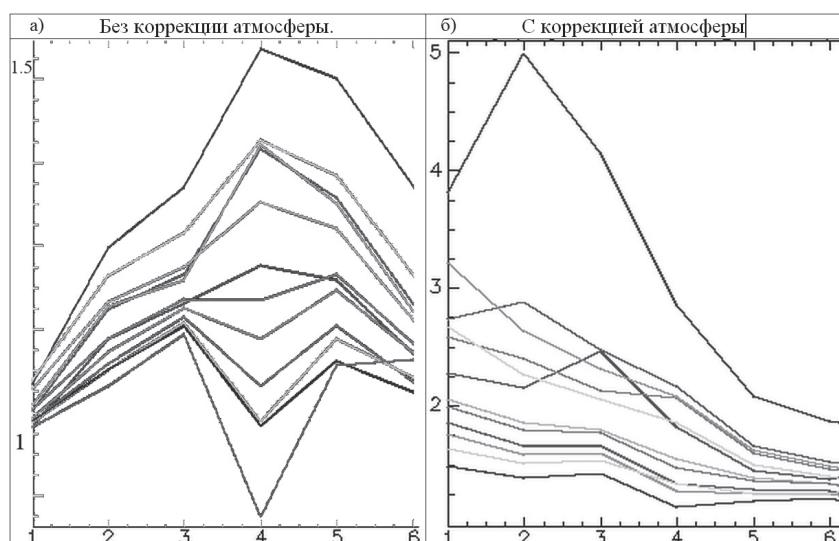
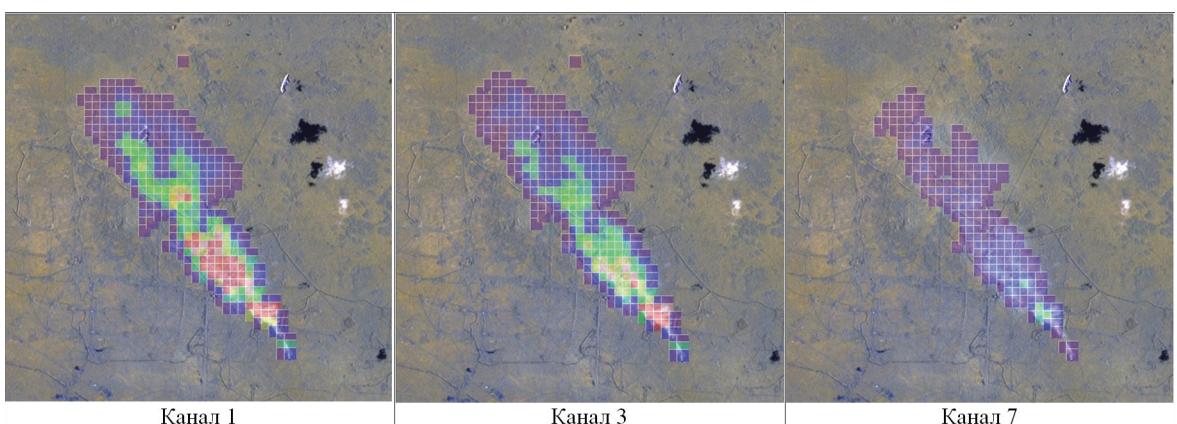


Рис. 2. Интерполяция «чистого снимка» 24 мая 2002 г. по снимкам 12 августа 2002 г. и 22 апреля 2002 г. в разных комбинациях спектральных каналов



*Рис. 3. Отношение спектральной яркости «чистого снимка» и снимка с шлейфом. По абсциссе – спектральные каналы 1–5 и 7. Кривые соответствуют участкам вдоль оси шлейфа длиной по 1 км, начиная с источника и до расстояния 12 км:
а) без коррекции атмосферы, б) с коррекцией атмосферы по QUAC*



*Рис. 4. Коэффициент поглощения, определенный по отношению снимка с отдувкой к интерполированному «чистому» снимку. В разных спектральных каналах.
Цветокод: красный – коэффициент поглощения ≥ 2 .
Коэффициент поглощения менее 0,2 – без цвета*

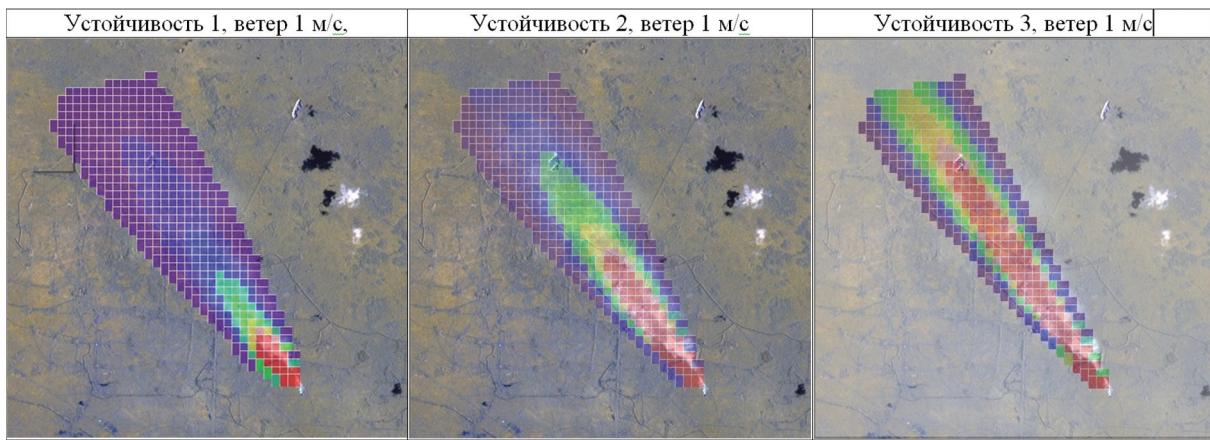


Рис. 5. Вид модельного шлейфа коэффициента поглощения во 2-ом канале при объеме газовоздушной смеси 20 м³/с и выбросе сажи 100 г/с. При 3 разных метеоусловиях. Цветокод: красный – коэффициент поглощения = 0,3, менее 0,03 – без цвета. Дальняя часть шлейфа обрезана

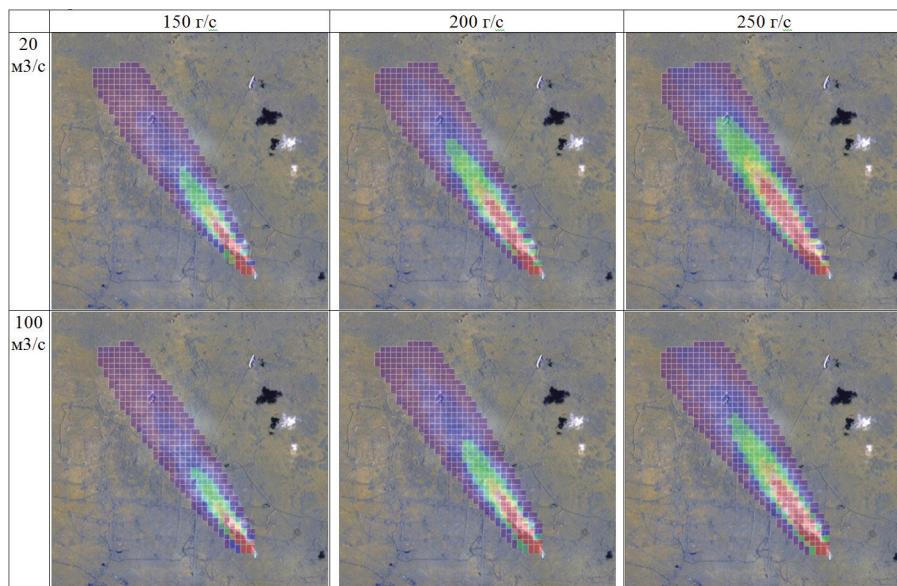


Рис. 6. То же при разном объеме газовоздушной смеси, м³/с, и выбросе сажи, г/с. Устойчивость 2, скорость ветра 1 м/с, нет инверсии. Цветокод: красный – коэффициент поглощения >=2, <0,2 – без цвета

На основе совокупности подобных модельных данных в каждой точке расчетной сетки и каждом спектральном канале определялся модуль невязки между коэффициентом поглощения по модели и по наблюдениям Landsat. Результат усреднялся по части шлейфа и по спектральным каналам 2–7, и этот параметр («итоговая невязка») оптимизировался. Для получения более четкого экстремума по метеоусловиям и параметрам источника потребовалось ограничить область расчета невязки расстояниями до источника 3–10 км.

Возникает оптимум невязки (*рис. 7*) при объеме газовоздушной смеси 100 м³/с, скорости ветра 1 м/с, устойчивости 2 и выбросе сажи 150–250 г/с. При этих параметрах расход газа – 1,5–2 м³/с, масса горючих форм углерода 750–1000 г/с, и получается полнота сгорания 0,7–0,85. Недожиг великократ, но в целом это вполне реалистичные значения.

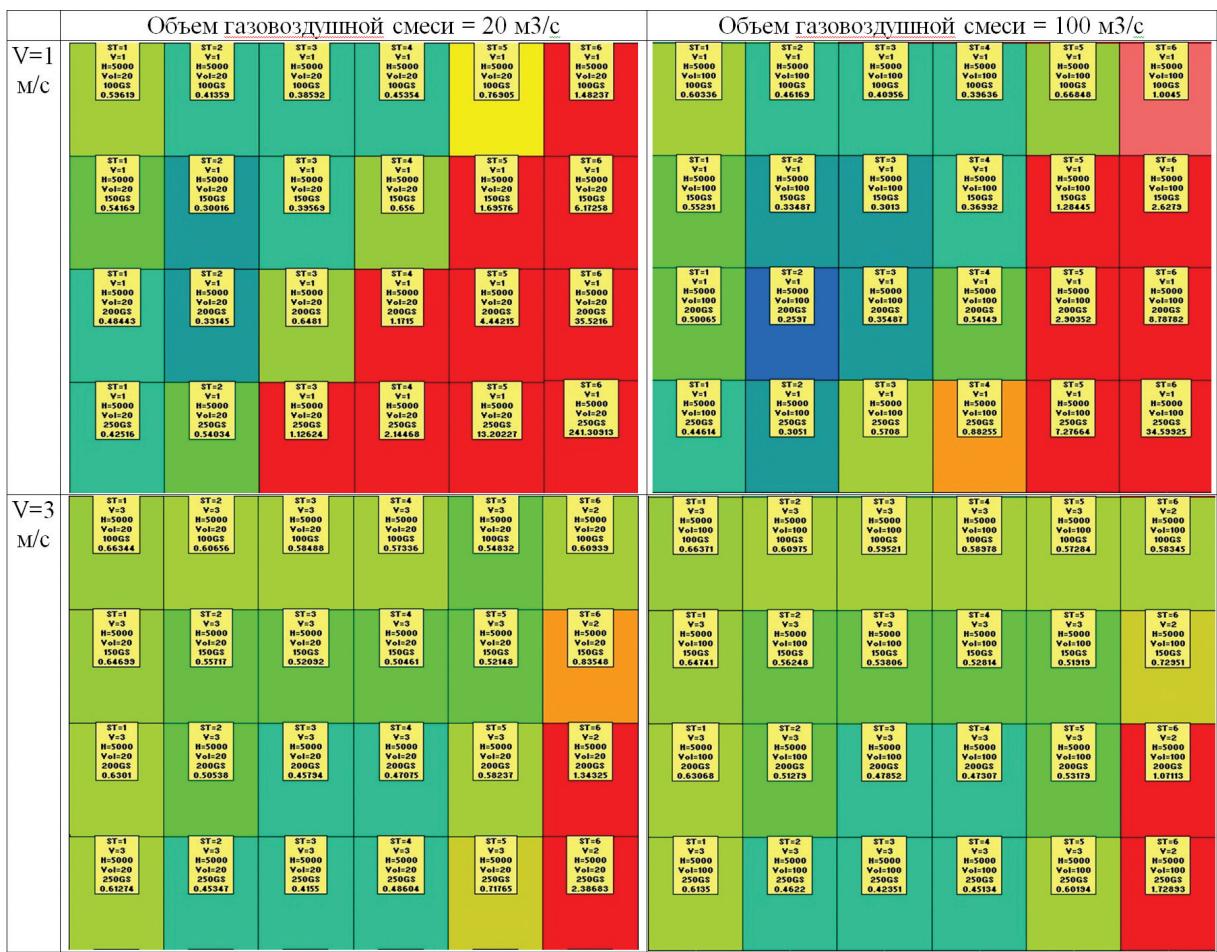


Рис. 7. Невязка коэффициента поглощения между модельным и реальным шлейфом.

Среднее по зоне шлейфа на расстояниях 3–10 км от источника.

Среднее по каналам 2–7. Инверсии нет. Для скоростей ветра 1 и 3 м/с, объемов газовоздушной смеси 20 и 100 м³/с. По горизонтали: устойчивость от 1 до 6, по вертикали сверху вниз: выброс сажи 100–250 г/с. Цветокод: красный – невязка >= 1

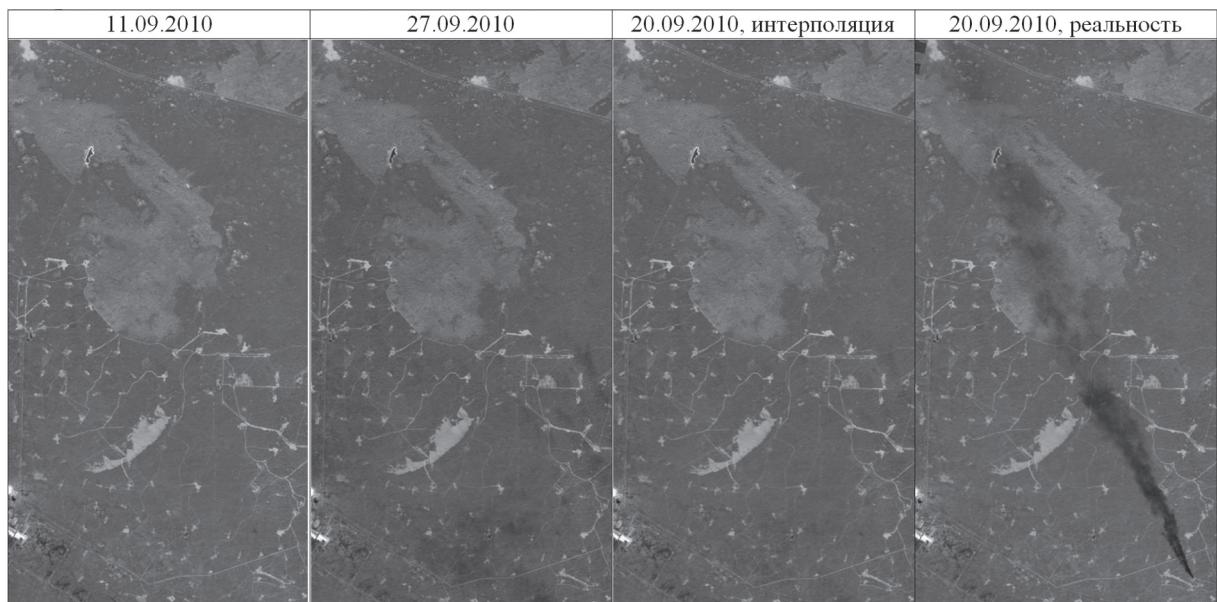


Рис. 8. Интерполяция «чистого снимка» 20 сентября 2010 г. по снимкам 11 сентября 2010 г. и 27 сентября 2010 г. для спектральных каналов 5, 3, 1.

Нормировка всех каналов: максимум (255) соответствует КСЯ = 1

Оценки концентраций сажи и метеопараметров на снимке 2010 г.

Исходные данные приведены на *рис. 8*. *Рис. 9* показывает эффект коррекции атмосферы. Каждая кривая соответствует поглощению в спектральных каналах 1–5 и 7 для одной зоны расстояний до источника. Без коррекции атмосферы рост поглощения с длиной волны противоречит данным об удельном коэффициенте поглощения сажи, так как для коротких волн поглощение маскируется атмосферой. С коррекцией атмосферы по FLAASH падение поглощения с длиной волны соответствует данным об удельном коэффициенте поглощения сажи. Все дальнейшие результаты получены с коррекцией атмосферы по FLAASH. *Рис. 10* показывает коэффициент поглощения по данным Landsat, аналогично данным 2002 г.

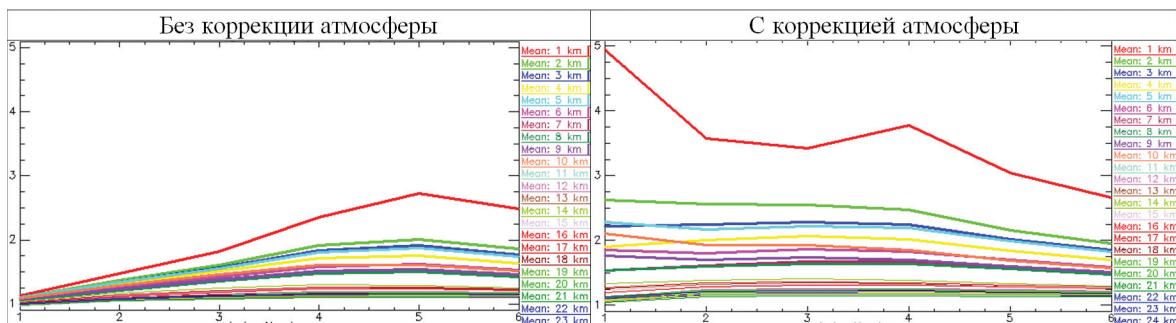


Рис. 9. Отношение КСЯ снимка без шлейфа (11.09) к снимку со шлейфом (20.09) для зон 1–24 км от источника а) без коррекции атмосферы, б) с коррекцией атмосферы

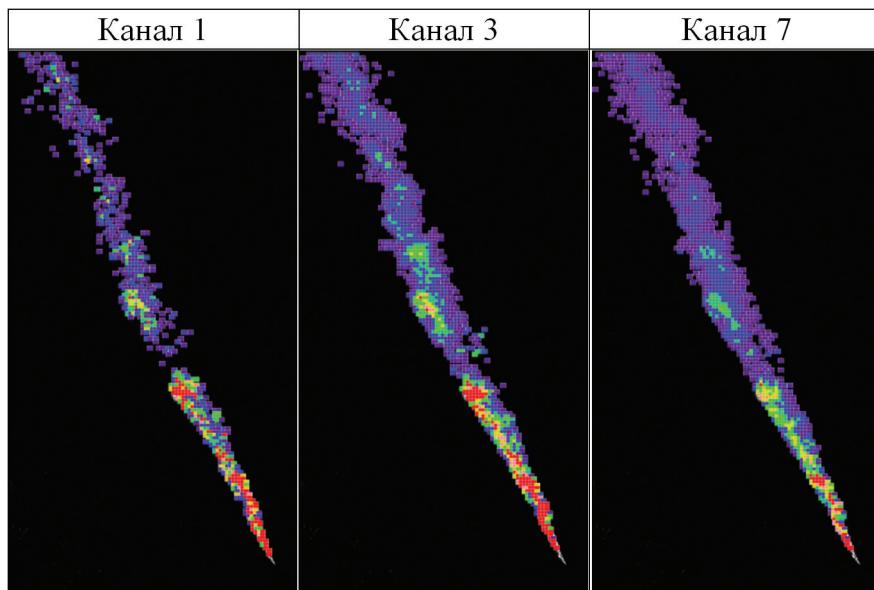


Рис. 10. Коэффициент поглощения, определенный как отношение спектральной яркости интерполированного «чистого» снимка к снимку со шлейфом от 20.09. 2010. Цветокод: красный ≥ 1

В отличие от 2002 г., постулировался коэффициент недожига 10%, поэтому варьируемым параметром был только удельный расход газа. На основе модельных концентраций, рассчитанных для разных расходов газа и метеоусловий, в каждой точке расчетной сетки и каждом спектральном канале определялся энтропийный показатель невязки между

коэффициентом поглощения по модели и по наблюдениям Landsat. Результат усреднялся по части шлейфа и по спектральным каналам 2–5, и этот параметр («итоговая невязка») оптимизировался. Результаты показывает *рис. 11*. Для получения более четкого экстремума потребовалось ограничиться точками с коэффициентом поглощения больше 0,2.

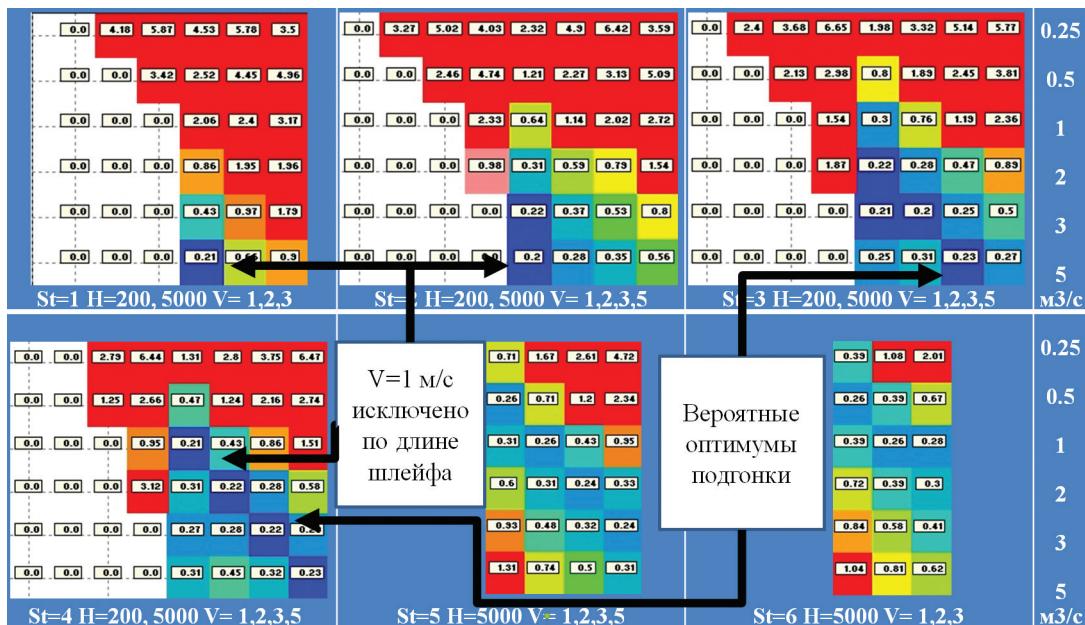


Рис. 11. Энтропийная невязка коэффициента поглощения по данным Landsat и модели ISC3ST в зависимости от удельного расхода газа ($0,25\text{--}5 \text{ m}^3/\text{c}$, шкала справа) и метеоусловий. Диаграммы для каждой категории устойчивости $St=1\text{--}6$, левая половина – высота инверсии $H=200 \text{ м}$, правая – $H=5000 \text{ м}$ (без инверсии), скорости ветра в каждой половине по абсциссе: 1, 2, 3, 5 м/с. Для устойчивости 5 и 6 показана только $H=5000 \text{ м}$, так как зависимости от H нет. Цветокод: красный > 1

Видно, что существуют оптимумы почти одинаковой глубины для разных метеоусловий и расходов газа. В качестве дополнительного критерия для отбора оптимума были исключены значения скорости ветра 1 и 2 м/с, так как при них для образования видимого шлейфа длиной около 30 км потребовалось бы соответственно более 8 и 4 ч, что маловероятно. Осталось три варианта: устойчивость $St=3$, скорость ветра $V=3 \text{ m/s}$, расход газа $Vol=5 \text{ m}^3/\text{c}$; $St=4$, $V=3 \text{ m/s}$, $Vol=3 \text{ m}^3/\text{c}$; $St=4$, $V=5 \text{ m/s}$, $Vol=5 \text{ m}^3/\text{c}$. Предпочтение было отдано второму варианту, так как в нем чуть лучше показатель невязки и он не находится на краю расчетного диапазона параметров.

Сравнение результатов с объективными данными

Отдувка 2002 г. По данным удаленной метеостанции, скорость ветра на момент отдувки – около 3 м/с, категория устойчивости 3. Данные с метеорологических постов предприятия, вероятно, точнее, чем данные метеостанции, но они варьируют во времени и пространстве. Те, где направление ветра соответствует направлению, видимому на снимке, все дают скорость ветра 4 м/с, так что она и была принята за реальную.

Налагая эти ограничения на материалы для оптимизации невязки модели и наблюдений, получаем оптимум при $100 \text{ м}^3/\text{с}$, 250 г/с . Он, хотя и значительно хуже, чем найденный без ограничений (невязка 0,42 против 0,26), но сохраняет реалистичность: расход газа $1,5\text{--}2 \text{ м}^3/\text{с}$, полнота сгорания 0,7. Цифра удельного расхода газа по порядку величины соответствует данным предприятия для стандартной отдувки ($3,24 \text{ м}^3/\text{с}$).

Отдувка 2010 г. Здесь были использованы как данные метеостанции, так и данные постов предприятия. Направление ветра, близкое к наблюдаемому на снимке, дает только один пост, и для него скорость ветра $3\text{--}4 \text{ м/с}$ и устойчивость 4. Эти значения хорошо соответствуют определенным выше по «слепой» подгонке модели.

Необходимо также удостовериться, что полученный по результатам оптимизации вывод об отсутствии атмосферной инверсии соответствует метеоданным. По расчетам на основе данных метеостанции, на момент снимка высота инверсии – между 1 и 1,3 км. Рис. 12 показывает, что при значениях метеопараметров и расхода газа, полученных подгонкой, основная часть вертикального профиля факела не достигает этой высоты и, таким образом, вывод об отсутствии влияния инверсии подтверждается.

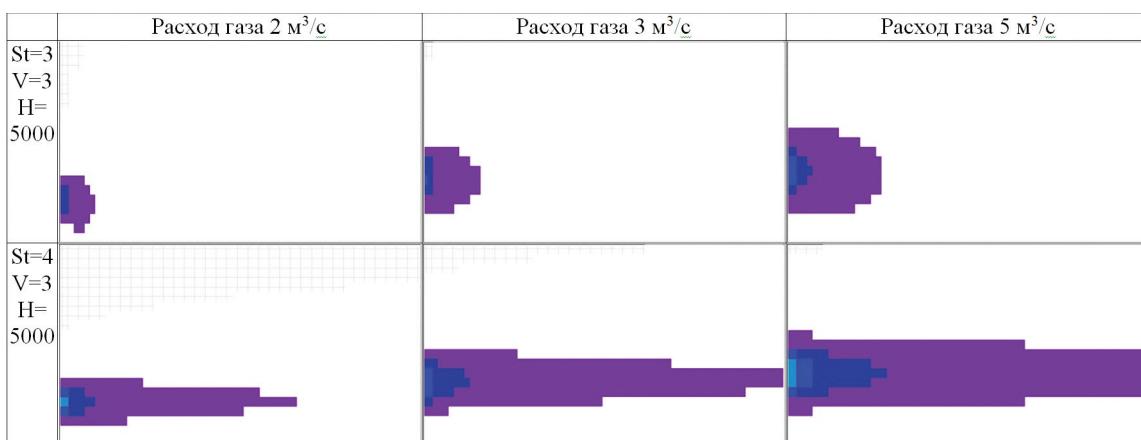


Рис. 12. Вертикальный профиль шлейфа сажи при различных метеопараметрах и параметрах источника (удельный расход газа). Абсцисса – расстояние от источника (0–20 км), ордината – высота (0–2000 м). Цветокод: красный $\geq 1 \text{ мг/м}^3$, менее 0.1 мг/м^3 – без цвета

Полученная нами в результате подгонки модели цифра удельного расхода газа $3 \text{ м}^3/\text{с}$ хорошо соответствует данным предприятия для стандартной отдувки ($3,24 \text{ м}^3/\text{с}$). Это свидетельствует о том, что рассматриваемая отдувка происходила в примерном соответствии с номинальными параметрами, за исключением полноты сгорания. При бессажевом горении шлейф наблюдаемой плотности не мог получиться. Хорошее согласие параметров шлейфа по данным Landsat с моделью, в основу которой была положена гипотеза 90% полноты сгорания, показывает, что эта цифра недалека от истины.

С точки зрения оценки риска для здоровья населения, если полученная нами полнота сгорания углерода соответствует полноте сгорания сероводорода, то остаточный сероводород заметно увеличивает токсичность отдувки, которая для полного сгорания связана только с SO_2 . Однако все же сероводород не доминирует в риске, создаваемом отдувкой,

и общая картина опасности не отличается принципиально от той, которая получается при полном сгорании. Предположение о более высоком недожиге, который мог бы резко повысить опасность отдувки, не подтверждается материалами Landsat.

Сопоставление результатов по отдувкам 2002 и 2010 годов. Для 2002 г. независимая оценка метеопараметров по шлейфу менее точна. Параметры источника получаются разумные, хотя и со слишком большим коэффициентом недожига (до 30%). Если наложить дополнительные условия соответствия метеопараметров реальным измерениям на момент отдувки, параметры источника почти не изменяются, что свидетельствует о недостаточной чувствительности метода оценки. Вероятно, это связано с тем, что объем газовоздушной смеси и выброс в г/с оцениваются раздельно и независимо.

Для 2010 г. получаются хорошие оценки как метеопараметров, так и параметров источника (в предположении 10% недожига углерода). Они соответствуют как объективным метеорологическим измерениям на момент отдувки, так и расходу газа по модели, использованной в ПДВ. Вероятно, превосходство оценок 2010 г. связано с тем, что объем газовоздушной смеси и выброс в г/с были жестко связаны, так как зависели от одного подгоняемого параметра – удельного расхода газа (при адекватности предположения о 10%-ом недожиге). Кроме того, оценки 2010 г. улучшены в отношении способа оптимизации: использовался более тонкий критерий невязки – энтропийный, производилась тщательная селекция отбираемой для оптимизации части шлейфа и др.

Выводы

- По космическому снимку с ИСЗ Landsat при наличии модели источника можно оценивать концентрации сажи, метеоусловия и одновременно – параметр источника (в данном случае расход газа). Основа для оценки – модель рассеяния выброса в атмосфере.
- Полученные оценки для 2010 г: расход газа $3 \text{ м}^3/\text{с}$, устойчивость атмосферы категории 3 или 4, скорость ветра 3–4 м/с – близко согласуются с данными предприятия.
- Оптимумы подгонки модели достаточно широкие и нужна дополнительная априорная информация для однозначного определения параметров модели.
- Для успешной подгонки модели необходимы коррекция атмосферы в наблюдениях и интерполяция по другим снимкам для получения «чистого снимка» без выброса.
- Имеется существенная неопределенность в определении количественных параметров концентрации и выброса загрязнителя из-за неопределенности удельного коэффициента поглощения сажи (в основном из-за зависимости от размера частиц).

**Fitting the emission model and meteorology to Landsat data
on pollutant plumes from gas well pumping**

B.M. Balter, D.B. Balter, V.V. Egorov, M.V. Stalnaya

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences

117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya Str.

E-mail: Balter@mail.ru

Landsat observations of plumes from gas well pumpings were used to obtain soot concentration and emission parameters, including the gas flow and burning efficiency. The process was based on fitting to observed plume form and optical density the model plumes generated by dispersion model ISC3ST as functions of fitted parameters of emission and atmosphere. Atmospheric parameters included wind speed and stability. The fitted parameters agree well with independent data provided by the gas field owner.

Keywords: Landsat, ISC3ST, fitting, plume, gas well pumping, health risk.