

Автоматическое обнаружение вулканического пепла по спутниковым данным

А. А. Филей

Дальневосточный центр НИЦ «Планета», Хабаровск 680000, Россия

E-mail: vmer@dvrpod.ru

В статье представлен алгоритм автоматического обнаружения вулканического пепла по спутниковым данным с применением пяти спектральных каналов на длинах волн 0,6; 1,6; 3,7; 11 и 12 мкм. Такой выбор спектральных каналов был физически обоснован на примере взаимодействия вулканического пепла с электромагнитным спектром. Качество обнаружения вулканического пепла представленного «пятиканального» алгоритма сравнивалось с классическим методом «обратного поглощения», основанным только на разности яркостных температур на длинах волн 11 и 12 мкм (brightness temperature difference, BTD[11, 12]). Сравнение проводилось с использованием целого ряда тематических спутниковых сцен, на которых запечатлён выброс вулканического пепла. Результаты показали, что новый «пятиканальный» алгоритм не только более чувствителен к присутствию вулканического пепла, но и меньше подвержен ошибкам, присущим методу «обратного поглощения». Также он позволяет обнаружить смешанный с облачностью вулканический пепел, в то время как из-за наличия воды/льда в облаке полезный сигнал BTD[11, 12] метода «обратного поглощения» может теряться.

Ключевые слова: вулканический пепел, яркостная температура, спутниковые данные

Одобрена к печати: 22.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-63-73

Введение

Вулканический пепел представляет собой аэрозоль в виде горных пород, минералов и вулканического стекла. Облако вулканического пепла может содержать газообразные растворы двуокиси серы, хлор и другие химические элементы. Хорошо известно, что вулканический пепел оказывает непосредственное влияние на окружающую среду и здоровье человека. Однако главная опасность, которую он в себе несёт, заключается в абразивном воздействии на двигатели самолёта. В работе (Miller, Casadevall, 2000) описаны опасные и трагические случаи прохождения воздушных судов через облака вулканического пепла, а также связанные с этим финансовые убытки авиакомпаний.

Прямые наземные или самолётные наблюдения за вулканическими облаками в глобальном масштабе ограничены, для этих целей лучше всего подходит спутниковый мониторинг. В своё время были разработаны различные автоматические алгоритмы обнаружения вулканического пепла по спутниковым данным. В работе (Higurashi, Nakajima, 2002) для определения вулканических облаков использовались четыре канала данных радиометра SeaWiFS в диапазоне 412–865 нм. В статье (Bonfiglio et al., 2005) представлен метод обнаружения вулканического пепла на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) по данным радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Методы на основе ИНС эффективны, но требуют для обучения нейронных сетей большое количество разнородных данных за несколько лет и для каждого конкретного региона.

На практике для обнаружения вулканического пепла по спутниковым данным чаще всего применяют метод «обратного поглощения» (Prata, 1989a, b), который является в большинстве случаев основой в структуре других алгоритмов обнаружения вулканического пепла. Физический принцип этого метода заключается в использовании яркостной температуры (brightness temperature, BT) на длинах волн 11 и 12 мкм, а точнее разности яркостных температур BTD [11, 12] (brightness temperature difference). Метод «обратного поглощения» хорошо себя зарекомендовал в обнаружении вулканических облаков на фоне облачности.

В рамках настоящей работы представлен алгоритм автоматического обнаружения облаков вулканического пепла с использованием пяти спектральных каналов спутникового прибора на длинах волн 0,6; 1,6; 3,7; 11 и 12 мкм. Физическое обоснование такого выбора спектральных каналов подтверждено на примере взаимодействия вулканического пепла с электромагнитным спектром. Качество полученной с помощью «пятиканального алгоритма» пепловой маски сравнивалось с результатами метода «обратного поглощения».

Физические основы обнаружения вулканического пепла

Физические основы обнаружения вулканического пепла рассмотрены на примере зависимости мнимой части комплексного показателя преломления (I_m) частиц пепла от длины волны. Мнимая часть комплексного показателя — это величина, прямо пропорциональная интенсивности поглощения электромагнитного излучения частицей вещества на определённой длине волны (Pavolonis, 2006). На *рис. 1* показана зависимость I_m от длины волны для двух вулканических горных пород: андезита и базальта, — а также представлен показатель I_m для капель воды и кристаллов льда. Данные I_m для андезита и базальта были получены из работы (Pollack et al., 1973), для частиц воды и льда — из библиотеки libradtran 2.0 (Mayer et al., 2017). На *рис. 1* видно, что частицы вулканических горных пород будут поглощать инфракрасное (ИК) излучение сильнее на длине волны 11 мкм, чем на 12 мкм, в то время как для капель воды и кристаллов льда будет обратное. Эта особенность лежит в основе классического метода обнаружения частиц вулканического пепла — метода «обратного поглощения». Таким образом, для облачности и ясного неба разность $\text{VTD}[11, 12]$ будет положительной, а для чистого непрозрачного вулканического пепла в сухой атмосфере — отрицательной.

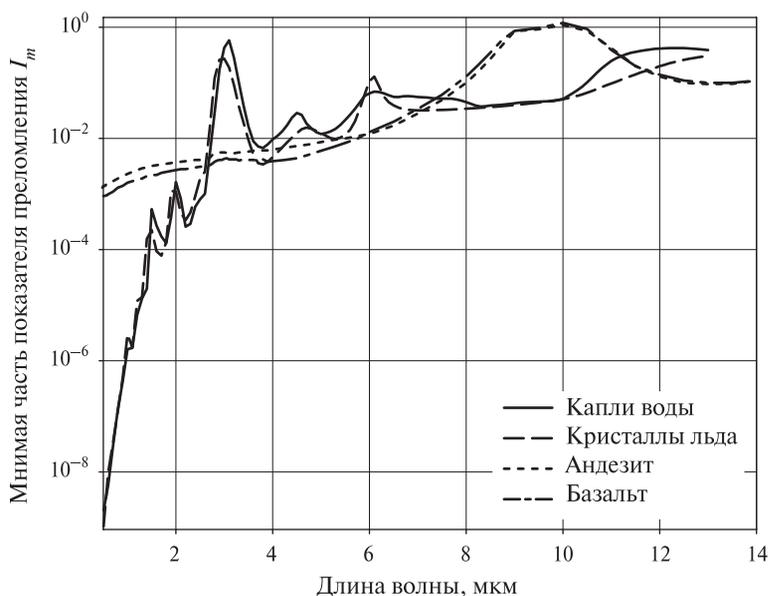


Рис. 1. Зависимость мнимого показателя преломления от длины волны для андезита, базальта, капель воды и кристаллов льда

Метод «обратного поглощения» весьма эффективен, однако существует ряд ограничений, которые также приводят к отрицательным значениям $\text{VTD}[11, 12]$. Эти ограничения обобщены и представлены в работе (Prata et al., 2001):

- 1) сильная приземная температурная инверсия;
- 2) невулканические аэрозоли (дым, песок, пыль);
- 3) стратосферная температурная инверсия;
- 4) инструментальный шум и рассогласование в каналах спутникового радиометра;

- 5) пепловые облака с неопределённым содержанием воды или льда;
- 6) высокое содержание водяного пара;
- 7) края облачных образований.

Ситуации, когда данные ограничения приводят к отрицательным значениям ВТД [11, 12], могут быть разрешимы, если вулканический пепел идентифицируется вручную путём тщательного масштабирования изображения по ВТД [11, 12]. Чаще всего такое масштабирование будет отображать контраст между вулканическим облаком и другими объектами. Однако при использовании метода «обратного поглощения» в автоматической обработке спутниковых сцен эти ограничения могут приводить к большому количеству ложных сигналов.

Цель работы заключается в разработке автоматического алгоритма обнаружения вулканического пепла с исключением как можно большего числа вышеупомянутых ограничений с применением дополнительного анализа спутниковых измерений в видимой части спектра. Рассмотрим на *рис. 2* зависимость альbedo однократного рассеяния (single scattering albedo, SSA) от длины волны в видимой части спектра. Она построена для андезита и базальта с эффективным радиусом частиц (r_e) 3 мкм, а также для сферических капель воды и несферических кристаллов льда с r_e , равным 10 и 40 мкм соответственно.

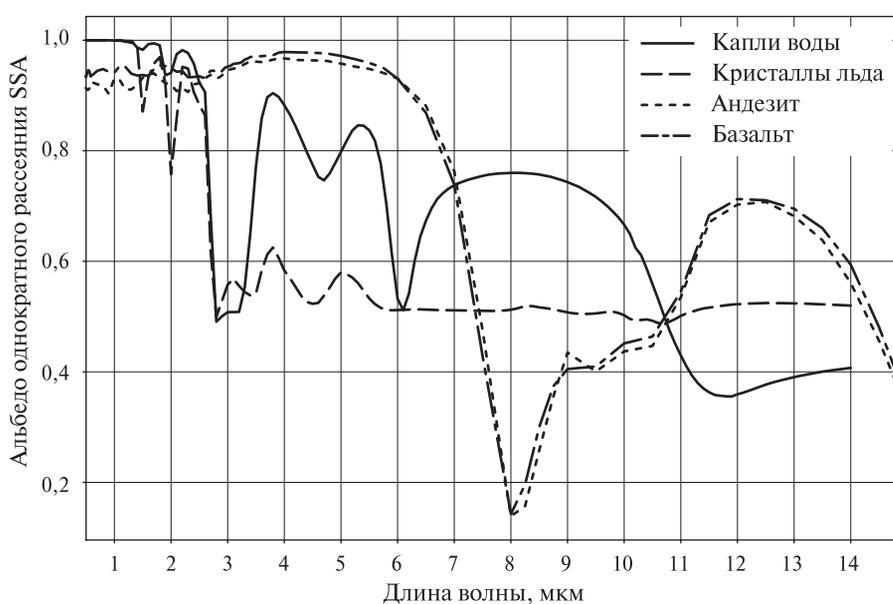


Рис. 2. Зависимость альbedo однократного рассеяния от длины волны для андезита, базальта, капель воды и кристаллов льда

Альbedo SSA можно интерпретировать как вероятность, что фотон света будет рассеян частицей вещества с учётом ослабления. Все значения SSA, представленные на *рис. 2*, были получены расчётами по теории Ми, при этом для андезита и базальта использовалось лог-нормальное распределение (Pavolonis, 2006) частиц по размеру, для капель воды и кристаллов льда — гамма-распределение (Mayer et al., 2017). Анализируя *рис. 2*, можно заметить, что в видимой части спектра в окрестности длины волны 0,6 мкм SSA вулканического пепла значительно меньше, чем для воды или льда, которые имеют SSA, близкое к единице. В ближней инфракрасной (БИК) области спектра, в районе 3,7 мкм, вулканический пепел и капли воды часто могут иметь одинаковое SSA и рассеивают фотоны интенсивнее, чем кристаллы льда. Было также установлено, что чем меньше частицы вне зависимости от состава, тем они интенсивнее рассеивают излучение в видимой части спектра. Длины волн 0,6 и 3,7 мкм были выбраны неслучайно, так как большинство современных спутниковых радиометров функционируют на этих длинах волн, равно как на 11 и 12 мкм. Однако на радиометрах AVHRR/3, которые устанавливаются на космических аппаратах (КА) серии MetOp, канал 3,7 мкм работает

только в ночное время, и в качестве альтернативы в алгоритм был включён канал на длине волны 1,6 мкм. Но нужно учесть, что данный канал меньше подходит для обнаружения вулканического пепла, так как SSA на этой длине волны для капельной облачности практически равно единице, а для кристаллической — не многим меньше SSA самого пепла.

На основе информации, представленной на *рис. 2*, и при предположении, что SSA есть прямой показатель коэффициента отражения в каналах спутникового прибора, был получен ряд критериев в качестве физической основы для разработки автоматического алгоритма обнаружения вулканического пепла. Данные критерии подробно будут описаны в следующих разделах настоящей статьи.

Моделирование переноса излучения

С учётом описанных в предыдущем разделе физических основ взаимодействия вулканического пепла с электромагнитным спектром были смоделированы коэффициент отражения на длинах волн 0,6 (R[0.6]), 1,6 (R[1.6]) и 3,7 мкм (R[3.7]) и яркостная температура на длинах волн 11 (BT[11]) и 12 мкм (BT[12]), а также построены зависимости между ними. Для моделирования использовалась быстрая радиационная модель (radiative transfer model, RTM) на основе программного кода DISORT (Discrete Ordinates Radiative Transfer) (Buras et al., 2011), входящего в состав библиотеки libRadtran (www.libradtran.org) (Mayer et al., 2017). Моделирование производилось для чистого вулканического пепла (андезит), капельной и кристаллической облачности, а также для смеси облачности и пепла. При этом радиус r_c для пепла принимался равным 3 мкм, для капельной и кристаллической облачности — 10 и 40 мкм соответственно. При моделировании оптическая толщина (τ_c) в видимой части спектра для всех типов чистых (без пепла) облаков варьировалась от 3 до 30. Расчёты выполнялись для различных сочетаний углов наблюдения и освещения, разных моделей атмосферы, но при постоянной высоте верхней границы облаков (для кристаллических облаков и смешанных облаков льда и пепла — 10 км, для капельных облаков и смешанных облаков воды и пепла — 3 км). Все расчёты проводились над водной поверхностью с альбедо, равным 0,03.

При разработке алгоритма обнаружения вулканического пепла использовался большой диапазон различных сценариев моделирования, однако в настоящей работе для ясности приведена лишь небольшая выборка этих сценариев. На *рис. 3* (см. с. 67) показаны результаты некоторых расчётов моделирования переноса излучения, выполненных для стандартного профиля летней модели атмосферы умеренных широт с общим содержанием осаждаемого водяного пара (precipitable water vapor, PWV) 20 мм, температурой подстилающей поверхности (T_{surf}) 280 К, зенитным углом наблюдения (viewing zenith angle, VZA) 10°, солнечным зенитным углом (solar zenith angle, SZA) 50° и относительным азимутальным углом (relative azimuth angle, RAA) 90°.

Все зависимости строились как для смешанных облаков (пепел + облачность), так и для чистого пепла и чистой облачности. Для смешанных облаков показано несколько кривых, которые строятся для постоянной $\tau_c = 1$ и $\tau_c = 5$ как для капельной облачности, так и для кристаллической, при этом τ_a варьируется от 0,1 до 10. Отдельные точки с цифрами на кривых для смешанных облаков и чистого пепла представляют оптическую толщину вулканического пепла (τ_a), а для чистой облачности — τ_c .

Рисунок 3а (см. с. 67) подтверждает предположение о том, что вулканический пепел имеет меньший коэффициент отражения, чем капельное или кристаллическое облако при той же высоте и оптической толщине (см. *рис. 2*). Это также справедливо для смешанных облаков при условии: $\tau_a > 1$ и $\tau_a > \tau_c$. Смешанные облака, в которых преобладают капли воды или кристаллы льда, не могут быть однозначно идентифицированы с помощью данного алгоритма как загрязнённые вулканическим пеплом.

На *рис. 3б* отчётливо видно, что канал на длине волны 1,6 мкм плохо подходит для обнаружения пепла при наличии капельной облачности. Однако, подобрав некоторые критерии, можно разделить кристаллическую облачность и вулканический пепел. В следующем разделе

будет показано, что зависимость $R[1.6]/R[0.6]$ от $R[0.6]$ вполне подходит для детектирования вулканического пепла.

Согласно *рис. 3в*, вулканический пепел в верхних слоях тропосферы показывает более низкий отрицательный сигнал $VTD[11, 12]$, чем все смешанные облака льда и пепла. Однако в нижних слоях тропосферы пепел имеет либо незначительное отрицательное значение $VTD[11, 12]$, либо положительное. Это же относится и к вулканическому пеплу, смешанному с капельной облачностью, когда отрицательный сигнал $VTD[11, 12]$ и вовсе теряется. Смешанные облака льда и пепла, так же как и чистый пепел, имеют отрицательные значения $VTD[11, 12]$. Однако с увеличением τ_a возможно положительное значение $VTD[11, 12]$, например больше 1 К. Присутствие льда может фактически управлять радиационными свойствами облаков: с увеличением τ_c кристаллической облачности отрицательный сигнал постепенно теряется, а при высоких τ_c и вовсе исчезает, даже если $\tau_a > \tau_c$.

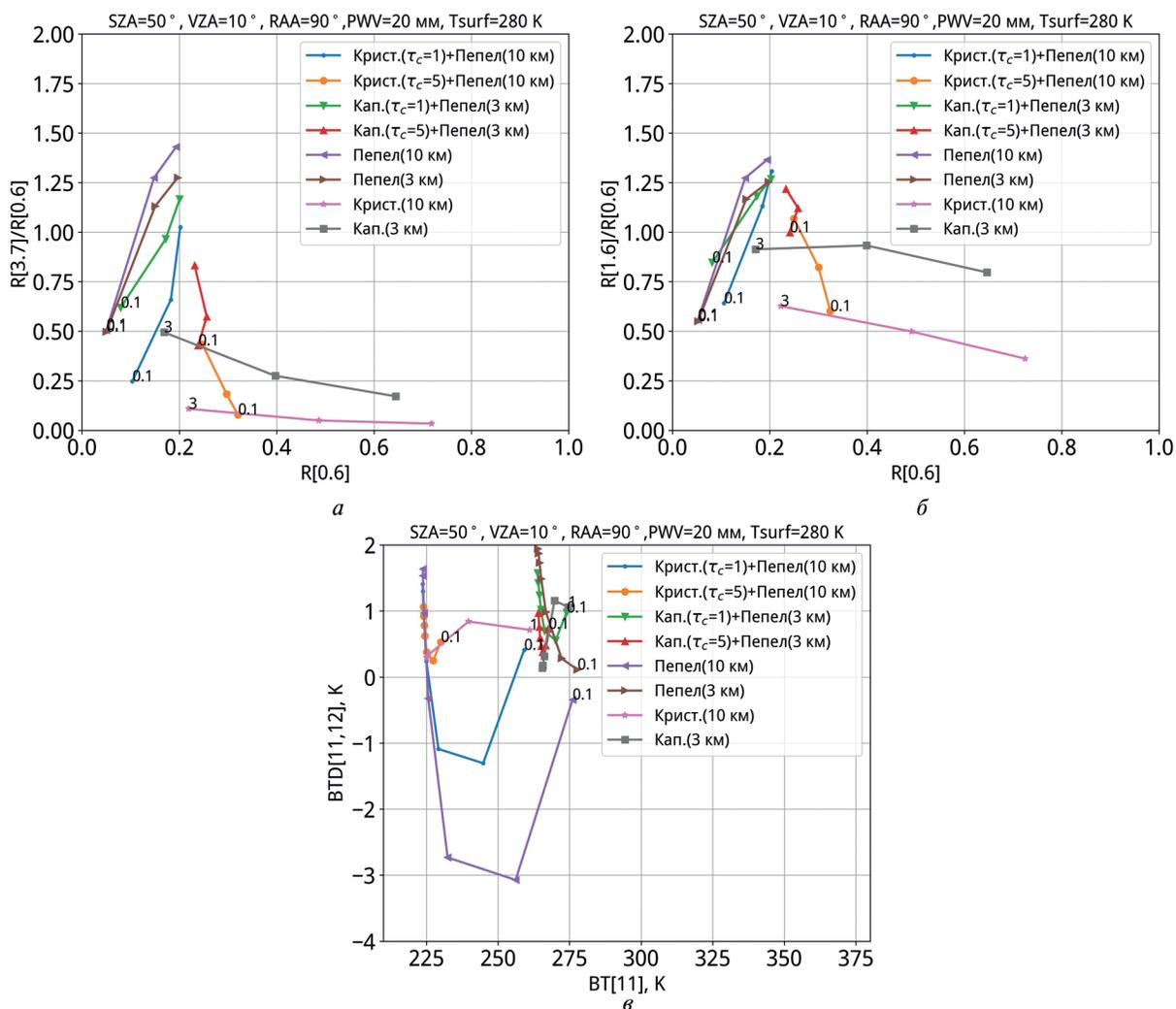


Рис. 3. Результаты расчётов моделирования переноса излучения для смешанных облаков (пепел + облачность), чистого пепла и чистой облачности: *а* — зависимость отношения $R[3.7]/R[0.6]$ от $R[0.6]$; *б* — зависимость отношения $R[1.6]/R[0.6]$ от $R[0.6]$; *в* — зависимость $VTD[11, 12]$ от $VT[11]$

Роль содержания воды/льда в смешанных с пеплом облаках является одной из важных тем, которая требует тщательного изучения и в рамках настоящей работы рассматриваться не будет, так же как и влияние PWV . Однако дополнительный анализ на предмет чувствительности электромагнитного спектра на наличие PWV показал, что для вулканического пепла с малой τ_a разница между $VTD[11, 12]$ для различных значений PWV может достигать 0,5 К.

Это ещё раз подчёркивает сложность использования метода «обратного поглощения» для обнаружения вулканического пепла в автоматическом алгоритме. Решить проблему обнаружения вулканического пепла при наличии облачности и PWV частично может дополнительное использование коэффициентов отражения в коротковолновой области спектра.

Реализация алгоритма

В этом разделе представлены пороговые спектральные тесты, которые были рассчитаны на основе моделирования переноса излучения, описанного в предыдущем разделе, а также с учётом анализа спутниковых сцен. Тесты, которые однозначно связаны с обнаружением вулканических облаков и описывают их спектральные особенности, представлены в *таблице*.

Тесты, используемые для обнаружения пикселей, содержащих вулканический пепел

№	Условие	Примечание
1	$R[3.7] / R[0.6] > 1 \ \& \ \text{VTD}[11, 12] < 0,0 \text{ K} \ \& \ \text{VT}[11] < 280 \text{ K}$	Чистый вулканический пепел или смешанная с пеплом кристаллическая облачность
2	$R[3.7] / R[0.6] > 1 \ \& \ \text{VTD}[11, 12] < 1,5 \text{ K} \ \& \ \text{VT}[11] > 260 \text{ K}$	Смешанная с пеплом капельная облачность
3	$R[3.7] / R[0.6] > 0,65 \ \& \ R[0.6] < 0,35 \ \& \ \text{VT}[11] < 230 \text{ K}$	Чистый вулканический пепел или смешанная с пеплом кристаллическая облачность в верхней тропосфере
4	$R[1.6] / R[0.6] > 1 \ \& \ R[0.6] < 0,4 \ \& \ \text{VT}[11] < 260 \text{ K} \ \& \ \text{VTD}[11, 12] < 1,5 \text{ K}$	Оптически толстые вулканические облака чистого пепла или смешанного с кристаллической облачностью
5	$R[1.6] / R[0.6] > 0,65 \ \& \ R[0.6] < 0,4 \ \& \ \text{VT}[11] < 260 \text{ K} \ \& \ \text{VTD}[11, 12] < 0,0 \text{ K}$	Оптически тонкие вулканические облака чистого пепла или смешанного с кристаллической облачностью

В случае, когда одновременно выполняются все тесты определённой строки из *таблицы*, в пикселе присутствует вулканический пепел. Если спутниковый прибор одновременно работает на длинах волн 1,6 и 3,7 мкм, то используются только пороговые тесты № 1–3, а тесты № 4 и 5 не учитываются. Результатом работы пороговых тестов является построение маски вулканического пепла. К полученной маске применяется простой пространственный фильтр размером 9×9 пикселей. Помеченные как содержащие вулканический пепел пиксели в области 9×9 отбраковываются (относятся к не содержащим вулканический пепел) при условии, что их количество составляет менее 20 % от всех пикселей этой области. Этот простой фильтр действует для устранения рассеянных «шумных» пикселей и уменьшает количество случаев на краях облачности, ошибочно помеченных как пепел (Pavolonis, 2006).

Представленные в *таблице* тесты являются базовыми для обнаружения пикселей, с высокой вероятностью содержащих вулканический пепел. Однако существует ряд других факторов, которые могут влиять на обнаружение вулканического пепла, таких как: температура и альbedo подстилающей поверхности, солнечные блики, другие аэрозоли (дым от лесных пожаров, песчаная пыль, сажа и пр.). Влияние этих факторов на точность обнаружения пепла требует дополнительного исследования и в рамках настоящей работы не представлено.

Эффективность алгоритма

Для качественной оценки эффективности «пятиканального» алгоритма было рассмотрено не менее 80 спутниковых сцен по данным радиометров VIIRS (KA Suomi NPP) и AVHRR (KA MetOp), полученных за период с 2009 по 2018 г. для различных сезонов года. При этом рассматривались только извержения вулканов Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Результатом работы алгоритма являлась построенная маска вулканического пепла для каждой спутниковой сцены. Качество маски визуально сравнивалось с результатами, полученными

с помощью метода «обратного поглощения». Используемый в настоящей работе метод «обратного поглощения» работает следующим образом: пепел считается присутствующим, если $ВТД[11, 12]$ меньше $-0,2$ (Yu et al., 2002).

Рассмотрим на *рис. 4* (см. с. 69) спутниковую сцену, полученную с радиометра VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite; KA Suomi NPP), на которой наблюдается облако вулканического пепла при извержении вулкана Шивелуч на Камчатке.

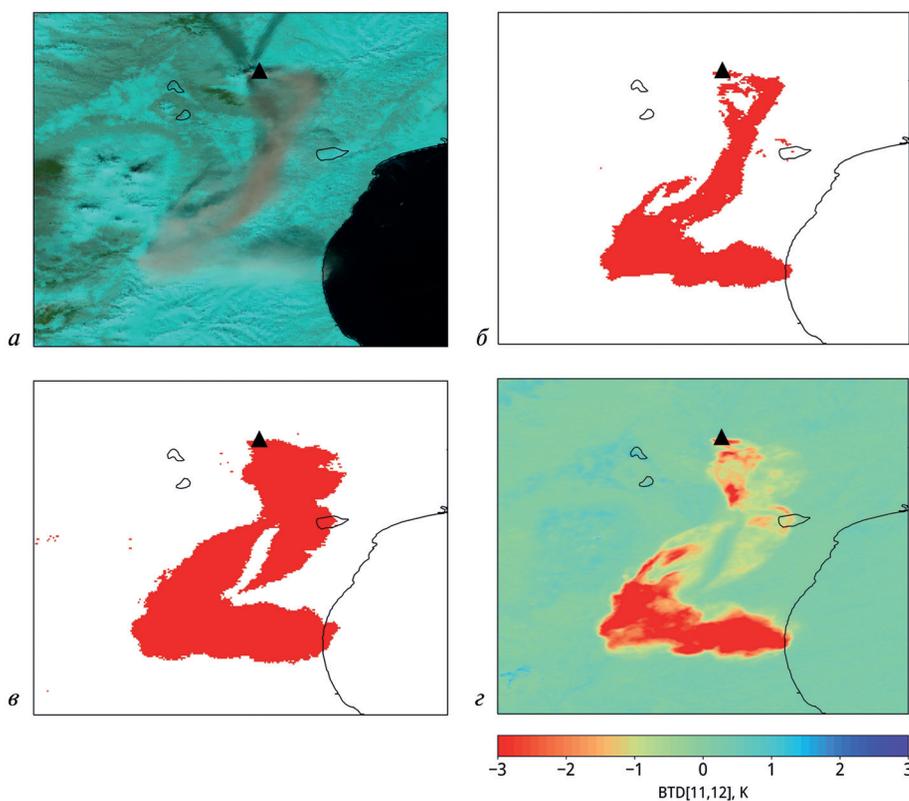


Рис. 4. Спутниковая сцена с радиометра VIIRS за 26.03.2015 01:32 GMT: *a* — цветосинтезированное изображение; *б* — маска вулканического пепла, полученная с помощью «пятиканального» алгоритма; *в* — маска вулканического пепла, полученная с помощью метода «обратного поглощения»; *г* — цветокодированная разность яркостных температур $ВТД[11, 12]$

На *рис. 4а* отчётливо виден пепловый шлейф, который хорошо контрастирует на фоне подстилающей поверхности. Маски вулканического пепла, рассчитанные с помощью «пятиканального» алгоритма и метода «обратного поглощения», построены на *рис. 4б* и *в* соответственно и выделены красным цветом. На *рис. 4г* представлена разность яркостных температур $ВТД[11, 12]$ с использованием цветокодированной шкалы.

На *рис. 4г* помечены два участка: № 1 и 2. Участок № 1 определен с помощью «пятиканального» алгоритма, участок № 2 — с использованием метода «обратного поглощения». Визуально участок № 2 на *рис. 4а* не виден, однако $ВТД[11, 12]$ сигнализирует о присутствии пепла в этой области. Участок № 1 визуально хорошо просматривается на *рис. 4а*, но $ВТД[11, 12]$ не подтверждает наличие в этой области пепла. Дополнительный попиксельный анализ участка № 1 позволил установить, что $ВТД[11, 12]$ — положительное, а $R[3.7]/R[0.6] > 1$, что, согласно *рис. 3*, говорит о наличии на этом участке смешанной с пеплом кристаллической облачности. Дополнительный попиксельный анализ участка № 2 показал, что $R[3.7]/R[0.6] < 0,1$, $ВТД[11, 12]$ — отрицательное, $ВТ[11]$ — около 263 К, что может свидетельствовать о наличии температурной инверсии, ледяного тумана или полупрозрачной взвеси водного раствора диоксида серы, который, агрегируя с пеплом, даёт отрицательный сигнал $ВТД[11, 12]$.

Следующая спутниковая сцена, представленная на *рис. 5* (см. с. 70), получена по данным радиометра AVHRR (КА MetOp-A) при извержении вулкана Пик Сарычева. Из *рис. 5б* можно заметить, что метод «обратного поглощения» выявил очень много ложных сигналов, при этом само ядро (участок № 1 на *рис. 5г*) вулканического выброса не было обнаружено. Детальный анализ ядра вулканического выброса показал отсутствие отрицательного сигнала ВТД[11, 12]. Это может быть вызвано большой оптической толщиной пепла и/или наличием смеси льда и пепла. «Пятиканальный» алгоритм позволил обнаружить основной пепловый шлейф (*рис. 5б*) и сократить количество ложных сигналов.

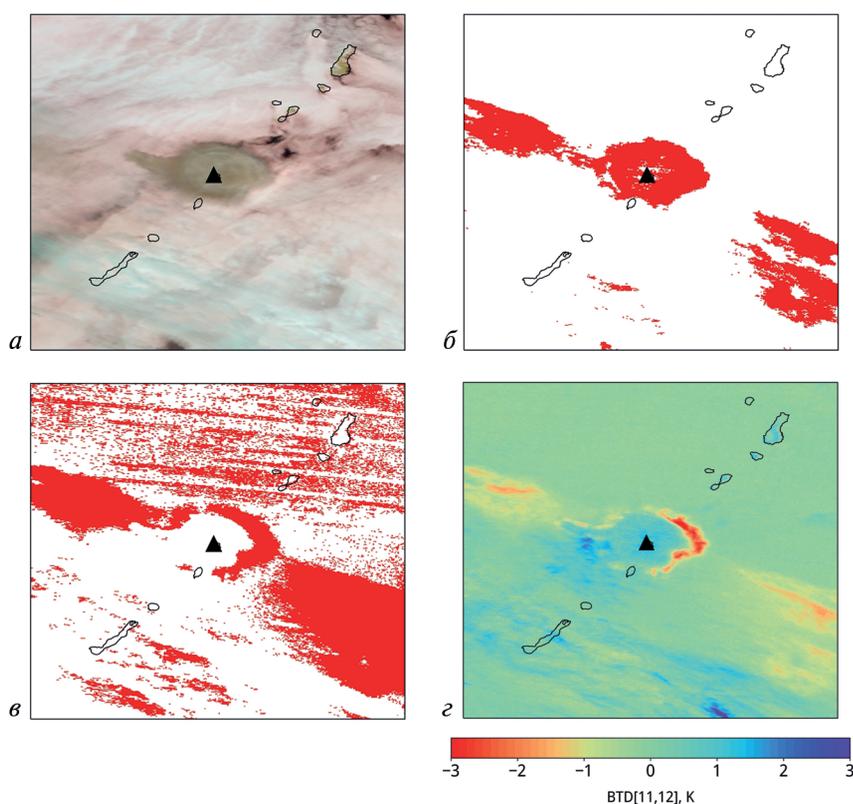


Рис. 5. Спутниковая сцена с радиометра AVHRR за 14.06.2009 23:00 GMT: *a* — цветосинтезированное изображение; *б* — маска вулканического пепла, полученная с помощью «пятиканального» алгоритма; *в* — маска вулканического пепла, полученная с помощью метода «обратного поглощения»; *г* — цветокодированная разность яркостных температур ВТД[11, 12]

Представленная на *рис. 6* спутниковая сцена, которая получена с радиометра AVHRR (КА MetOp-A) при извержении вулкана Павлова, представляет наиболее сложный случай. Визуально пепловый шлейф сливается с облачностью, и наблюдается полное отсутствие отрицательного сигнала ВТД[11, 12] (см. *рис. 6г*), а это закономерно ведёт к тому, что в автоматическом режиме метод «обратного поглощения» не сумел обнаружить пепел (см. *рис. 6в*). В свою очередь, «пятиканальный» алгоритм позволил обнаружить пепловый шлейф (см. *рис. 6б*).

В силу того, что эффективность работы представленного алгоритма оценивалась путём визуального анализа цветосинтезированных спутниковых изображений, результаты могут быть ошибочны. Ведь визуальный анализ подразумевает рассмотрение пеплового шлейфа на изображении в «истинных цветах», т. е. в цветах, свойственных глазу человека. Но достичь такого сочетания цветов на спутниковом изображении порой бывает невозможно. В связи с чем необходимо дополнительно проводить проверку эффективности алгоритма с применением объективных источников информации по рассмотренным случаям выбросов вулканического пепла. Чаще всего для этих целей используются лидарные/радарные спутниковые измерения,

например с КА CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) и CloudSat (Cloud Satellite), которые позволяют получать трёхмерные изображения атмосферных аэрозолей. Также могут использоваться измерения с ИК-гиперспектрометров, например AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), CrIS (Cross-track Infrared Sounder), IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), позволяющие не только обнаружить облака вулканического пепла, но и определить содержание диоксида серы как одного из индикаторов присутствия облаков пепла. С учётом вышесказанного дополнительная проверка эффективности работы представленного алгоритма с использованием объективных данных — это уже тема для дальнейшего исследования и в рамках настоящей работы не проводилась.

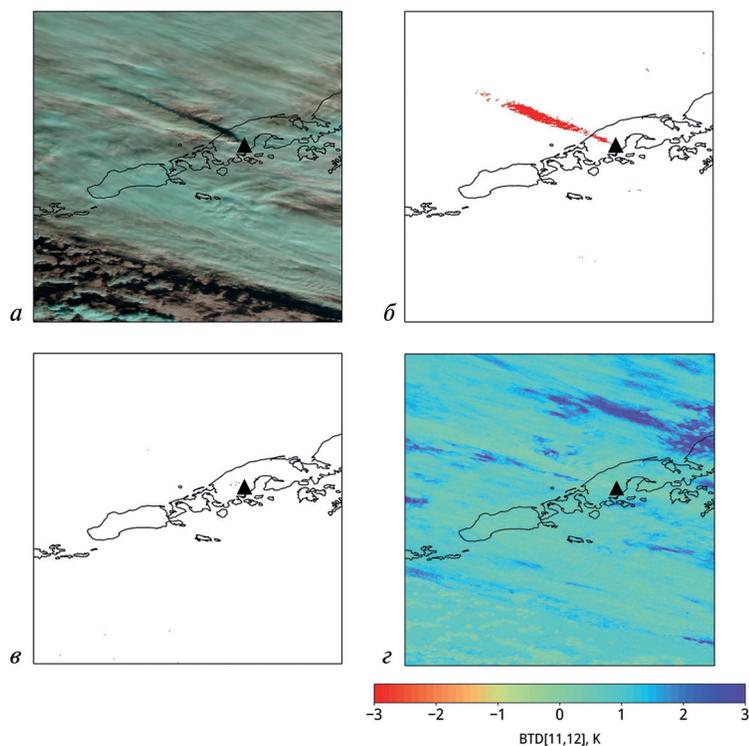


Рис. 6. Спутниковая сцена с радиометра AVHRR за 15.11.2014 21:32 GMT: *а* — цветосинтезированное изображение; *б* — маска вулканического пепла, полученная с помощью «пятиканального» алгоритма; *в* — маска вулканического пепла, полученная с помощью метода «обратного поглощения»; *г* — цветокодированная разность яркостных температур ВТД[11, 12]

Так как проверка эффективности разработанного алгоритма обнаружения вулканического пепла проводилась для конкретной группы вулканов, расположенных в определённом регионе (Дальний Восток России и Аляска), его применение для спутниковых изображений, полученных для другого региона земного шара с другими атмосферными условиями, характеристиками пепла, типом подстилающей поверхности, может привести к неоднозначным результатам. Для решения этой проблемы необходимо рассмотреть довольно большую выборку спутниковых данных по всему земному шару, что потребует огромных временных и вычислительных ресурсов. Результатом рассмотрения такой выборки, скорее всего, станет пересчёт пороговых тестов для конкретного региона и климатической зоны.

Заключение

В ходе работы был представлен алгоритм автоматического обнаружения вулканического пепла по спутниковым данным с применением пяти спектральных каналов на длинах волн 0,6; 1,6; 3,7; 11 и 12 мкм. Качественная оценка эффективности обнаружения вулканического

пепла разработанным алгоритмом и методом «обратного поглощения» на основе порога по ВТД[11, 12] показала, что «пятиканальный» алгоритм более чувствителен к присутствию вулканического пепла и менее подвержен ложным сигналам. Алгоритм хорошо показал себя при обнаружении оптически толстых облаков вулканического пепла, а также смешанного с облачностью пепла. Однако остался ряд вопросов, связанных с оценкой эффективности применения алгоритма для различных географических и климатических зон на большой выборке спутниковых сцен, и это является темой дальнейших исследований. Представленный в работе алгоритм заложил основу для обнаружения вулканического пепла с использованием отечественных спутниковых приборов МСУ-МР (многозональное сканирующее устройство малого разрешения) и МСУ-ГС (многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения), которые устанавливаются на КА серии «Метеор-М» и «Электро-Л».

Литература

1. *Bonfiglio A., Macchiato M., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V.* AVHRR automated detection of volcanic clouds // Intern. J. Remote Sensing. 2005. V. 26. P. 9–28. DOI: 10.1080/0143116042000274122.
2. *Buras R., Dowling T., Emde C.* New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2011. V. 112(12). P. 2028–2034. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.03.019.
3. *Higurashi A., Nakajima T.* Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. 1836 p. DOI: 10.1029/2002GL015357.
4. *Mayer B., Kylling A., Emde C., Buras R., Hamann U., Gasteiger J., Richter B.* LibRadtran user's guide. 2017. 155 p. URL: <http://www.libradtran.org/doc/libRadtran.pdf>.
5. *Miller T.P., Casadevall T.J.* Volcanic ash: Hazards to aviation // Encyclopedia of Volcanoes. 2000. V. 1. P. 915–930.
6. *Pavlonis M.J.* A Daytime Complement to the Reverse Absorption Technique for Improved Automated Detection of Volcanic Ash // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2006. V. 23. P. 1422–1444. DOI: 10.1175/JTECH1926.1.
7. *Pollack J. B., Toon O. B., Khare B. N.* Optical properties of some terrestrial rocks and glasses // Icarus. 1973. V. 19. No. 3. P. 372–389. DOI: 10.1016/0019-1035(73)90115-2.
8. *Prata A. J.* (1989a) Observations of volcanic ash clouds in the 10–12-micron window using AVHRR/2 Data // Intern. J. Remote Sensing. 1989. V. 10(4–5). P. 751–761. DOI: 10.1080/01431168908903916.
9. *Prata A. J.* (1989b) Radiative transfer calculations for volcanic ash clouds // Geophysical Research Letters. 1989. V. 16(11). P. 1293–1296. DOI: 10.1029/GL016i011p01293.
10. *Prata A. J., Bluth G. J. S., Rose W. I., Schneider D. J., Tupper A. C.* Comments on “Failures in detecting volcanic ash from a satellite-based technique” // Remote Sensing of Environment. 2001. V. 78. P. 341–346. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00231-0.
11. *Yu T. X., Rose W. I., Prata A. J.* Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using «split window» IR data from GOES and AVHRR // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. 4311 p. DOI: 10.1029/2001JD000706.

Automatic detection of volcanic ash using satellite data

A. A. Filei

*Far-Eastern Center of State Research Center
for Space Hydrometeorology “Planeta”, Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: vmer@dvrpod.ru*

The paper presents an algorithm for automatic detection of volcanic ash from satellite data using five spectral channels at wavelengths of 0.6, 1.6, 3.7, 11 and 12 microns. Such a choice of spectral channels was physically based on the example of interaction of volcanic ash with electromagnetic spectrum.

The detection quality of volcanic ash presented by the “five-channel” algorithm was compared with the classical reverse absorption technique. The reverse absorption technique is based on the brightness temperature difference of 11–12 μm (BTD [11, 12]). The comparison was made using several thematic satellite scenes, these scenes represent direct emission of volcanic ash. As a result, the new “five-channel” algorithm is not only more sensitive to the presence of volcanic ash, but also, as a rule, it is less prone to errors inherent in the reverse absorption technique. The algorithm can also detect cloud-mixed volcanic ash when the BTD[11, 12] useful signal of the reverse absorption technique is lost due to the presence of water/ice in the cloud.

Keywords: volcanic ash, brightness temperature, satellite data

Accepted: 22.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-63-73

References

1. Bonfiglio A., Macchiato M., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V., AVHRR automated detection of volcanic clouds, *Intern. J. Remote Sensing*, 2005, Vol. 26, pp. 9–28, DOI: 10.1080/0143116042000274122.
2. Buras R., Dowling T., Emde C., New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, Vol. 112(12), pp. 2028–2034, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.03.019.
3. Higurashi A., Nakajima T., Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data, *Geophysical Research Letters*, 2002, Vol. 29, 1836 p., DOI: 10.1029/2002GL015357.
4. Mayer B., Kylling A., Emde C., Buras R., Hamann U., Gasteiger J., Richter B., *LibRadtran user's guide*, 2017, 155 p., available at: <http://www.libradtran.org/doc/libRadtran.pdf>.
5. Miller T.P., Casadevall T.J., Volcanic ash: Hazards to aviation, *Encyclopedia of Volcanoes*, 2000, Vol. 1, pp. 915–930.
6. Pavolonis M.J., A Daytime Complement to the Reverse Absorption Technique for Improved Automated Detection of Volcanic Ash, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, Vol. 23, pp. 1422–1444, DOI: 10.1175/JTECH1926.1.
7. Pollack J. B., Toon O. B., Khare B. N., Optical properties of some terrestrial rocks and glasses, *Icarus*, 1973, Vol. 19, No. 3, pp. 372–389, DOI: 10.1016/0019-1035(73)90115-2.
8. Prata A.J. (1989a), Observations of volcanic ash clouds in the 10–12-micron window using AVHRR/2 Data, *Intern. J. Remote Sensing*, 1989, Vol. 10(4–5), pp. 751–761, DOI: 10.1080/01431168908903916.
9. Prata A.J. (1989b), Radiative transfer calculations for volcanic ash clouds, *Geophysical Research Letters*, 1989, Vol. 16(11), pp. 1293–1296, DOI: 10.1029/GL016i011p01293.
10. Prata A.J., Bluth G.J.S., Rose W.I., Schneider D.J., Tupper A. C., Comments on “Failures in detecting volcanic ash from a satellite-based technique”, *Remote Sensing of Environment*, 2001, Vol. 78, pp. 341–346, DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00231-0.
11. Yu T. X., Rose W.I., Prata A.J., Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using “split window” IR data from GOES and AVHRR, *J. Geophysical Research*, 2002, V. 107, 4311 p., DOI: 10.1029/2001JD000706.