

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫБОРОЧНЫХ РУБОК ЛЕСА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2014 г. С. М. Борзов^{1*}, О. И. Потатуркин^{1,2}

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск

*E-mail: borzov@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 08.07.2013 г.

Предложен метод обнаружения по данным дистанционного зондирования высокого разрешения незначительных пространственных изменений на поверхности Земли, вызванных антропогенным воздействием. Метод основан на попиксельном формировании разностных кадров за счет оценки согласованности изменения во времени одинаковых по яркости отсчетов изображений. Эффективность продемонстрирована на примере обнаружения выборочных рубок леса по разновременным изображениям спутника SPOT.

Ключевые слова: обработка спутниковых изображений, обнаружение антропогенных изменений, выборочная рубка леса

DOI: 10.7868/S0205961414030026

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса являются одним из важнейших инструментов мониторинга и исследования природно-техногенных объектов и явлений. Особое значение они приобретают при наблюдении за изменениями, происходящими на особо охраняемых природных территориях, поскольку зачастую данные ДЗЗ для них являются единственным источником независимой, объективной и актуальной информации.

Классический подход к обработке данных ДЗЗ состоит в попиксельном формировании тематических слоев, характеризующих спектральные свойства изображений, и их совместном анализе. Такой подход успешно используется при обработке данных низкого разрешения, однако при его увеличении излишняя детализация препятствует классификации. С другой стороны, повышение разрешения открывает дополнительные возможности как при мониторинге ландшафтных изменений, так и при обнаружении и распознавании объектов (Борзов, Потатуркин, 2012). Поэтому широкое распространение при обработке данных высокого разрешения получили более эффективные объектно-ориентированные методы. Типичная процедура их реализации состоит из сегментации (выделения однородных зон), определения признаков обнаруженных сегментов, их классификации и обнаружения изменений на основе выявления межклассовых переходов. Первый этап данной процедуры является ключевым и во многом определяет результат всего процесса в целом. Однако его выполнение на реальных данных ДЗЗ затруднено, поскольку для естественных ландшафтов

повышение разрешения отрицательно сказывается на качестве сегментации. По этой причине при обнаружении незначительных изменений с учетом различий условий освещенности и состояния атмосферы, а также естественной суточной и сезонной изменчивости, подобные методы обнаружения изменений оказываются низкоэффективными.

Цель работы – разработка метода обнаружения по данным ДЗЗ высокого разрешения незначительных пространственных изменений на поверхности Земли, вызванных антропогенным воздействием.

МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЗЗ

Одним из важных показателей антропогенных изменений является снижение плотности древостоя, что приводит к уменьшению в регистрируемом излучении компоненты, связанной с растительностью, и увеличение вклада открытых почв и вскрытого грунта. Соответственно наиболее информативными являются вегетационные индексы, характеризующие количество и состояния растительности, а также красный и коротковолновый инфракрасный (ИК) каналы, в которых преобладает почвенная компонента. При этом для обнаружения незначительных изменений на поверхности предлагается попиксельный разностный метод, использующий нормализацию изображений на основе поблочного согласования гистограмм (Townshend et al., 1992), а также построение и анализ разностных кадров на основе оценки согласованности изменения во времени одинаковых по яркости пикселей изображения (Bromiley et al., 2002).

Алгоритм обработки состоит из следующих этапов:

- геометрическое согласование разновременных изображений;
- выделение зоны интереса;
- гистограммное согласование разновременных изображений;
- формирование разностных кадров;
- постобработка разностных кадров.

На первом этапе с использованием средств геоинформационной системы (ГИС) выполняются пространственное совмещение разновременных спутниковых изображений и их преобразование в одну из стандартных картографических проекций.

На этапе выделения зоны интереса по наиболее раннему из серии обрабатываемых изображений осуществляется поиск зон, по которым необходимо проводить обнаружение изменений.

Далее по выделенным зонам выполняется попарное линейное согласование динамического диапазона яркости разновременных изображений. С этой целью изображения разбиваются на блоки определенного размера, и в каждом из блоков рассчитываются среднее значение μ и среднеквадратическое отклонение яркости σ . Размер блока определяется исходя из размеров характерных площадей изменений. Затем для каждого изображения путем билинейной интерполяции полученных значений для блоков формируются массивы $\mu(x, y)$ и $\sigma(x, y)$ (где x, y – координаты пикселей изображений). Динамические диапазоны яркости двух сравниваемых изображений $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ согласовываются с применением преобразования

$$\tilde{I}_2(x, y) = \left(\frac{\sigma_1(x, y)}{\sigma_2(x, y)} (I_2(x, y) - \mu_2(x, y)) + \mu_1(x, y) \right),$$

где $\tilde{I}_2(x, y)$ – преобразованное по динамическому диапазону изображение $I_2(x, y)$. Данная процедура позволяет устранить имеющиеся отличия изображений, вызванные изменением условий освещения и параметров регистрирующей аппаратуры.

Формирование разностного кадра осуществляется также поблочно на основе сравнения соответствующих фрагментов изображений $I_1(x, y)$ и $\tilde{I}_2(x, y)$. При этом для повышения достоверности обнаружения формируются и анализируются двумерные диаграммы изменения яркости $P(i, j)$, отображающие количество пикселей, которые в изображении $I_1(x, y)$ имеют яркость i , а в $\tilde{I}_2(x, y)$ яркость j . Каждое сечение i такой диаграммы представляет собой распределение яркости отсчетов в $\tilde{I}_2(x, y)$, имеющих яркость i в $I_1(x, y)$. Перпендикулярное же сечение j представляет собой распределение яркости отсчетов в $I_1(x, y)$, имеющих яркость j в $\tilde{I}_2(x, y)$. Для каждого уровня яркости i изображения $I_1(x, y)$ по сформированной диаграмме изме-

нения яркости $P(i, j)$ выполняется следующая процедура:

- в $\tilde{I}_2(x, y)$ определяется распределение яркости пикселей, имеющих заданную яркость в $I_1(x, y)$ (далее будем называть такое распределение гистограммой прямого разброса);
- по этой гистограмме находится наиболее часто встречающаяся яркость, и в $I_1(x, y)$ определяется распределение яркости пикселей, имеющих данную яркость в $\tilde{I}_2(x, y)$ (будем называть такое распределение гистограммой обратного разброса);
- в гистограмме обратного разброса определяется ширина полуспада в сторону увеличения яркости для почвенных каналов и уменьшения для вегетационных индексов;
- по гистограмме прямого разброса выделяются пиксели, отклонившиеся от максимума более чем на удвоенную ширину полуспада гистограммы обратного разброса.

В случае отсутствия изменений на наблюдаемом участке поверхности Земли, все пиксели одинаковой яркости первого изображения имеют близкую яркость и во втором. Если произошедшие изменения связаны с естественными причинами, такими как различное количество осадков, разные температурные режимы и т.п., однотипные пиксели локальных пространственных зон (по всей вероятности, относящиеся к одному и тому же виду поверхности) также ведут себя однообразно. При наличии антропогенных воздействий разброс их яркости увеличивается. Ширина же полуспада гистограммы обратного разброса определяется аппаратными погрешностями системы регистрации, а также естественными суточными и сезонными изменениями и может быть использована в качестве величины допустимого отклонения. В результате обработки разновременных изображений с применением изложенных процедур происходит выделение пикселей с нетипичным (для каждой пары изображений) изменением поканальной яркости. При этом удается избежать характерных недостатков разностных методов, связанных с необходимостью экспериментального подбора пороговых значений (Барталев и др., 2005).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование эффективности разработанного метода проведено на примере обнаружения выборочных рубок леса, поскольку данные ДЗЗ являются незаменимыми при решении подобных задач. По оценкам Федерального агентства лесного хозяйства, в России незаконно вырубается не менее 19 млн м³ древесины в год. По мнению большинства независимых экспертов, ситуация с незаконными рубками обстоит еще хуже. Чтобы изменить ситуацию, необходимо в первую очередь создать систему оперативного обнаружения таких рубок. С учетом имеющихся спектральных каналов, пространственного разрешения, площади

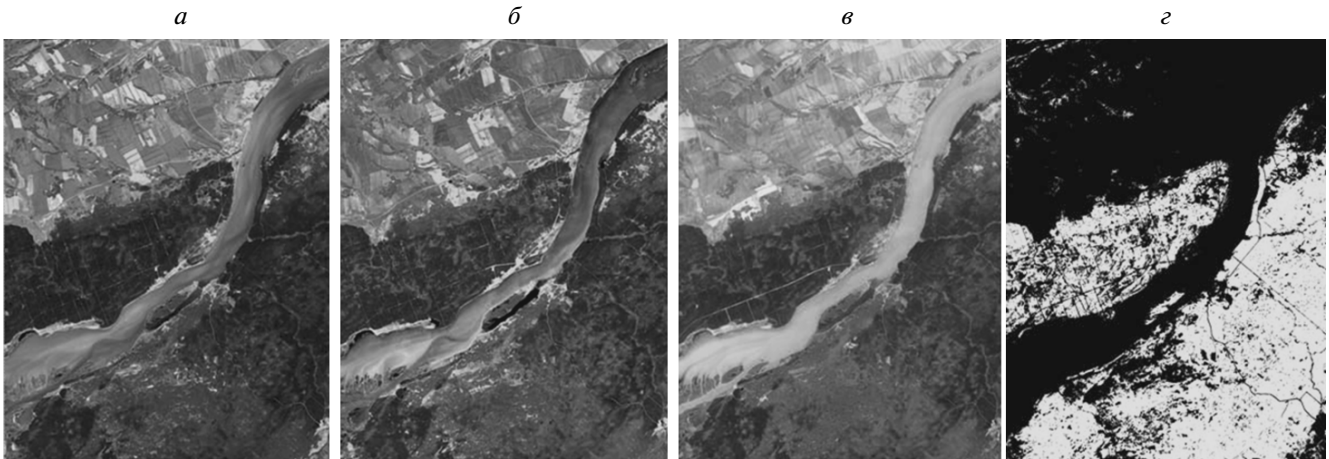


Рис. 1. Разновременные изображения спутника SPOT, полученные: *a* – 27 июля 2008 г.; *б* – 25 июня 2011 г.; *в* – 19 июля 2012 г.; *г* – маска растительности, сформированная по наиболее раннему изображению.

покрытия и частоты пролета спутника над одной и той же территорией, для обнаружения рубок наиболее подходят изображения со спутника SPOT (Шимов, Никитина, 2011) (каналы: зеленый (G) – 0.50–0.59 мкм, красный (R) – 0.61–0.68 мкм, ближний ИК (NIR) – 0.79–0.89 мкм, коротковолновый ИК (SWIR) – 1.58–1.75 мкм, ширина полосы съемки 60 км).

При этом для оценки количества и состояния растительности традиционно используются вегетационные индексы (Rouse et al., 1973). Кроме того, известны работы, в которых обнаружение сплошных рубок выполняется с применением текстурного анализа (Алтынцев и др., 2010). Однако при выявлении характерных для природоохранных территорий выборочных рубок такие подходы оказываются недостаточно эффективными. Специфика проведения выборочных рубок связана с тем, что растительность убирается не полностью (Парамонов, Маленко, 2007). Это могут быть как санкционированные рубки ухода, при которых убираются нежелательные деревья и создаются благоприятные условия для роста лучших пород, так и незаконная рубка лучшего леса с целью его реализации. Практика показала, что зачастую выборочная вырубка деловой древесины не приводит к уменьшению значения вегетационного индекса. Это связано с тем, что после спиливания старой сосны на ее месте открывается молодой подросток или травяной покров, и в результате значение вегетационного индекса для данного участка нередко даже увеличивается. По этой причине основным показателем проведения таких рубок являются увеличение компоненты излучения от открытых почв, а также появление участков вскрытого грунта. Соответственно наиболее информативными являются красный (R) и коротковолновый ИК (SWIR) каналы спутника SPOT.

Предложенный метод обнаружения незначительных изменений, вызванных антропогенным воздействием, продемонстрирован на примере

обнаружения выборочных рубок Караканского бора (Новосибирская обл.) по многоспектральным данным спутника SPOT-4. На рис. 1*a–в* приведены три разновременных изображения земной поверхности, полученные 27 июля 2008 г., 25 июня 2011 г. и 19 июля 2012 г. соответственно. С учетом размеров обрабатываемых изображений 1500×2000 пикселей и разрешения снимков 20 м общая площадь контролируемого участка составляет 1200 км^2 . Следует отметить, что все изображения не согласованы по яркости. Кроме того, на изображении от 19 июля 2012 г. присутствует пространственно неоднородная слабая дымка, контраст которой зачастую превосходит контраст обнаруживаемых изменений.

На рис. 1*г* приведена сформированная по наиболее раннему изображению маска растительности (зона интереса). Она создана путем исключения с.-х. земель, голых почв и водной поверхности на основе анализа пространственного распределения значений индекса влагосодержания (NDWI) и индикатора почв, сформированного по красному каналу.

Обработка изображений с целью выявления изменений в соответствии с изложенным методом ведется поблочно. Для согласования динамического диапазона яркостей использованы блоки 200×200 пикселей, а для последующего формирования разностного кадра – 100×100 пикселей. Размеры блоков выбраны экспериментально, исходя из характерных параметров изображений и происходящих изменений на поверхности Земли.

Продemonстрируем процедуру формирования разностного кадра с использованием диаграммы изменения яркости на одном из фрагментов изображения, где выявляемые изменения имеют очень низкий контраст, а атмосферные искажения, напротив, весьма существенны. На рис. 2*a* представлен фрагмент изображения от 25 июня 2011 г., на рис. 2*б* – этот же участок местности, полученный 19 июля 2012 г. после согласования ди-

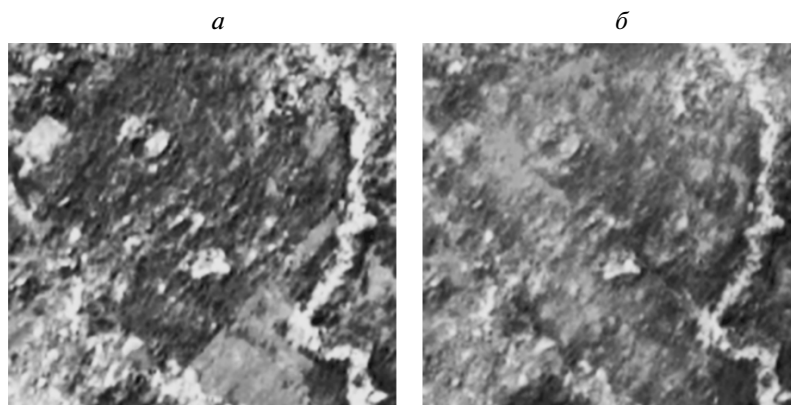


Рис. 2. Фрагмент изображений: *а* – от 25 июня 2011 г. и *б* – 19 июля 2012 г. после согласования динамических диапазонов яркости и дополнительного контрастирования.

а

	2	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	0	0	0	0	6	21	42	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	15	50	174	56	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	7	41	320	149	17	12	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	3	15	204	170	27	20	5	6	3	0	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	1	8	125	120	23	17	3	7	4	1	1	0	0	0	0	0
72	0	0	0	0	0	3	92	100	15	6	1	3	3	2	2	1	0	0	0	0
73	0	0	0	0	0	1	46	64	11	5	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
74	0	0	0	0	0	0	19	40	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	6	25	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76	0	0	0	0	0	0	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

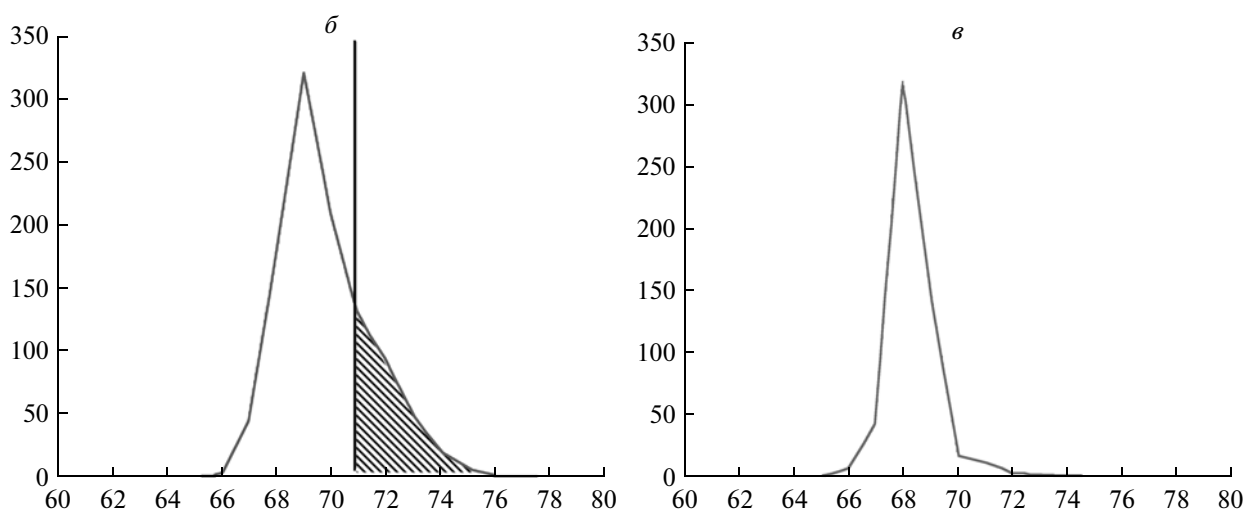


Рис. 3. *а* – Фрагмент диаграммы изменения яркости и гистограммы разбросов для уровней, соответствующих максимуму диаграммы: *б* – прямого и *в* – обратного.



Рис. 4. Обнаруженные изменения для фрагмента, показанного на рис. 2.

намических диапазонов яркости и дополнительного контрастирования. Отметим, что исходные фрагменты не приводятся, поскольку с учетом имеющихся полиграфических возможностей они визуально практически неразличимы. После выполнения указанных процедур на рис. 2а отчетливо видны границы проведенных в предшествующий период времени рубок (например, более светлый участок в правой нижней части фрагмента). На следующий год выборочная рубка была продолжена на остальной площади, покрытой сосновым лесом. При этом контраст прошлой рубки несколько снизился, почвенный и растительный покров частично восстановился.

Фрагмент диаграммы изменения яркости по каналу 2 (R) для данного изображения в табличном варианте представлен на рис. 3а. Можно видеть, что контраст изображений очень низкий, разброс яркости не превышает 13 градаций в диапазоне 256 градаций. На рис. 3б показана одна из гистограмм прямого разброса (вертикальное сечение рис. 3а), а на рис. 3в гистограмма обратного разброса (горизонтальное сечение рис. 3а).

Максимум гистограммы прямого разброса 320. Удвоенная ширина спада гистограммы обратного разброса на уровне 160 составляет две градации яркости (с интерполяцией и округлением до целых значений). Соответственно порог для гистограммы прямого разброса выбирается на уровне 71. Все отсчеты, относящиеся к заштрихованной части гистограммы прямого разброса, выделяются как изменившиеся. Данная процедура выполняется для всех уровней яркости, и формируется карта изменений для анализируемого фрагмента (рис. 4). Сравнивая полученную карту с исходными разновременными изображениями (рис. 2а, 2б) следует сделать вывод, что произошло выделение участков, на которых составляющая излучения связанная с отражением от почвы увеличилась.

Процедуры поблочного согласования динамического диапазона яркости изображений, форми-

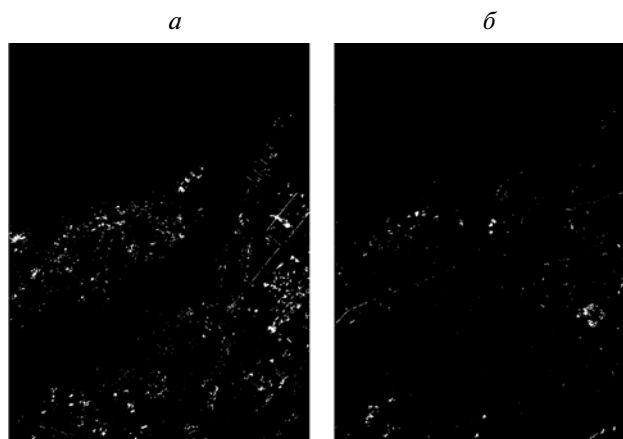


Рис. 5. Обнаруженные изменения для исходных изображений (рис. 1а–в).

рования разностных кадров и обнаружения на этой основе изменений осуществляются одновременно по каналам 2 и 4 спутника SPOT (R и SWIR). Анализ разностных кадров показал, что в каждом из них видны нарушения почвенного покрова. В канале SWIR влияние атмосферных искажений меньше, но изображения содержат более высокий уровень аппаратного шума, и это снижает их применимость. На этапе постобработки разностных кадров осуществляются совмещение полученных для обоих каналов отметок (выделенных пикселей) с использованием логической операции “И” и фильтрация малых (точечных) изменений с применением медианной фильтрации окном 3×3 .

На рис. 5а, б показаны результаты обработки исходных изображений (рис. 1а–в) с применением предложенной процедуры. По обрабатываемым парам изображений 2008–2011 гг. и 2011–2012 гг. было обнаружено 555 и 236 участков (площадью более 5 пикселей), изменения которых предположительно вызваны проведением выборочных рубок. Суммарная площадь обнаруженных вырубок за указанные периоды составляет 15 и 4,3 км² соответственно (площадь покрытия изображений – 1200 км²).

Для оценки эффективности предложенного алгоритма было выполнено сравнение результатов поиска с маской, сформированной оператором посредством применения разностного алгоритма с подбором пороговых значений на основе визуального анализа качества обнаружения. Показано, что для первой пары изображений ошибка первого рода (пропуски) составила 20%, ошибка второго рода (ложные обнаружения) – 0,087%. Для второй пары изображений – 18 и 0,24% соответственно.

На рис. 6а–в приведены примеры характерных фрагментов с обнаруженными изменениями. Первый столбец содержит фрагменты изображения от 25 июня 2011 г., второй – изображения тех же участков местности 19 июля 2012 г., третий – выявленные изменения.

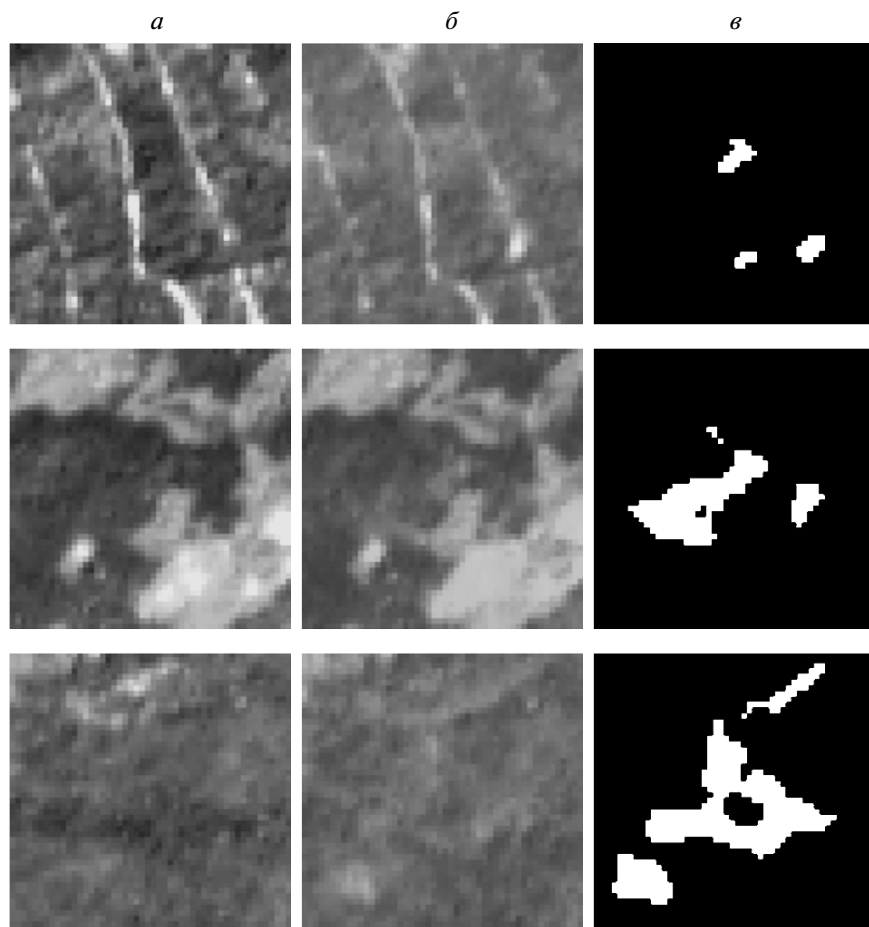


Рис. 6. Характерные примеры обнаружения изменений: фрагменты изображения: *a* – 25 июня 2011 г.; *б* – 19 июля 2012 г. и *в* – результаты обработки.

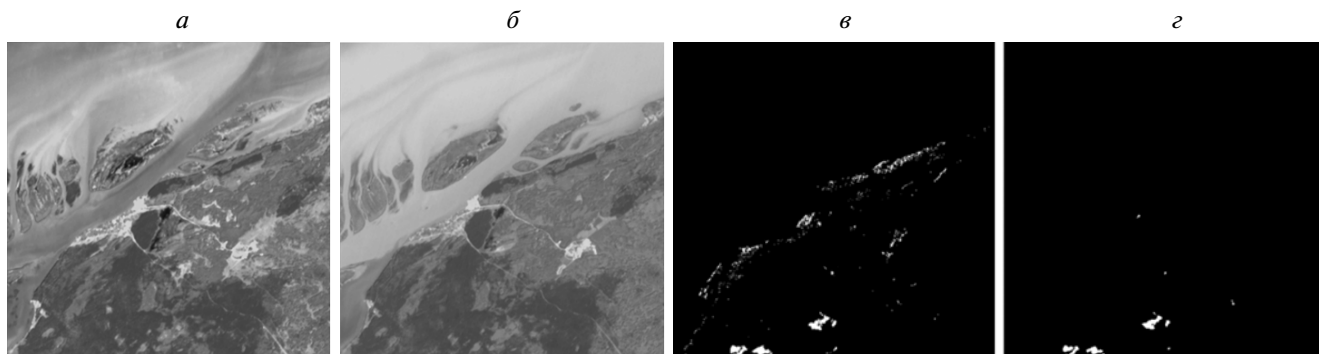


Рис. 7. Сравнение результатов обнаружения вырубок в зоне закрытой неоднородной дымкой разностным методом и методом на основе анализа диаграммы изменения яркости.

Основная проблема при обработке представленных изображений связана с наличием слабой, но неоднородной дымки. С ее влиянием можно бороться путем анализа временных серий изображений. Однако на практике зачастую приходится сталкиваться с отсутствием необходимого для этого количества снимков. Другой вариант состоит в снижении размеров блоков при выполнении процедуры согласования яркости изображений.

Но это может привести к появлению ошибок. Если размеры площади изменений становятся существенными, то они начинают влиять на статистические параметры изображений, используемые для вычисления корректирующих коэффициентов. Использование же при формировании решающего правила диаграммы изменения яркости позволяет корректно обнаруживать изменения, площади которых сопоставимы с размерами блоков. Ос-

новное требование — чтобы главная мода распределения относилась к неизменной территории. Рисунок 7а–г позволяет сравнить результаты обнаружения вырубок в зоне закрытой неоднородной дымкой, полученные при формировании разностного кадра простым попиксельным вычитанием после поблочного согласования динамических диапазонов яркости изображений красного канала (рис. 7в) и предложенным комбинированным алгоритмом (рис. 7г). В первом случае помимо верно обнаруженных вырубок к ним также были отнесены многочисленные пиксели в прибрежной территории, изменившие свою яркость в связи с наличием более плотной дымки. Комбинированный же алгоритм обнаруживает несогласованность в изменении одинаковых по яркости пикселей в пределах более мелкого блока изображения и таким образом более точно выделяет зоны, подвергшиеся воздействию. При этом порог обнаружения для разностного алгоритма подбирается оператором экспериментально путем анализа результатов обнаружения, предложенный же алгоритм участия оператора не требует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод обнаружения (по данным ДЗЗ высокого разрешения) незначительных пространственных изменений на поверхности Земли, вызванных антропогенным воздействием. Метод основан на поблочном (с билинейной интерполяцией) согласовании яркости разновременных изображений и формировании разностных кадров на основе диаграмм изменения яркости.

Эффективность разработанного метода продемонстрирована на примере обнаружения выборочных рубок Караканского бора (Новосибирская обл.) по данным спутника SPOT. Показано, что предложенная процедура обработки разновременных спутниковых изображений позволяет без участия оператора обнаруживать незначительные изменения, вызванные антропогенной деятельностью человека. Использование наряду с

блочным согласованием изображений механизма формирования разностного кадра на основе оценки согласованности поведения однотипных отсчетов обеспечивает более высокую достоверность результатов обнаружения в условиях наличия атмосферных искажений, а также сезонной и суточной изменчивости.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН (проект № 15.3), СО РАН (интеграционный проект № 74) и РФФИ (гранты № 11-07-00202, № 13-07-12202).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцева М.А., Гордиенко А.С., Гук А.А.* Вейвлет-анализ для выявления вырубок в лесных массивах по аэрофотоснимкам // ГЕО-Сибирь-2010. Т. 4. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология. Ч. 1: сб. матер. VI Междунар. науч. конгресса “ГЕО-Сибирь-2009”, 19–29 апреля 2010 г., Новосибирск. Новосибирск: СГГА, 2010. С. 3–8.
- Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю.* Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. Сб. ст. / Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. М.: “GRANP polygraph”, 2005. Т. II. С. 217–227.
- Борзов С.М., Потатуркин О.И.* Обнаружение антропогенных зон на основе поиска пространственных аномалий в крупномасштабных спутниковых изображениях // Автометрия. № 5. 2012. С. 104–111.
- Парамонов Е.Г., Маленко А.А.* Основы лесоводства и лесопаркового хозяйства. Барнаул: АГАУ, 2007. 170 с.
- Шимов С.В., Никитина Ю.В.* Технология мониторинга вырубок леса с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения // Геоматика. М.: Совзонд, 2011. № 3. С. 47–52.
- Bromiley P., Thacker N., Courtney P.* Non-parametric image subtraction using grey level scattergrams // Image and Vision Comp. 2002. V. 20. № 9–10. P. 609–617.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // Third ERTS Symp. NASA SP-351 I. 1973. P. 309–317.
- Townshend J., Justice C., Gurney C., McManus J.* The impact of misregistration on change detection // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1992. V. 30. P. 1054–1060.

Detection of Insignificant Anthropogenic Changes on the Earth Surface Using Remote Sensing Data

S. M. Borzov¹, O. I. Potaturkin^{1,2}

¹*Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk*

A method of detection for high-resolution remote sensing data of spatial changes in the Earth's surface caused by low anthropogenic impact. The method is based on the pixel-forming frame difference by evaluating the consistency changes over time for the same brightness image samples. The effectiveness is demonstrated by the detection of selective logging on the multi-temporal SPOT satellite images.

Keywords: processing of satellite images, change detection, shelterwood cutting