

Космический мониторинг геодинамических предвестников крупных землетрясений

В.Г. Бондур, А.Т. Зверев, Л.В. Кузнецова

*Научный центр аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»
105064 Москва, Гороховский пер., 4
E-mail: vgbondur@online.ru*

В настоящей работе представлены результаты мониторинга сейсмоопасной территории Южной Калифорнии в августе – октябре 2004 г. с использованием метода автоматизированного линеаментного анализа космических изображений. Возможности применения метода основаны на предположении о том, что системы линеаментов, регистрируемые на космических изображениях тесно связаны с сейсмогенными нарушениями и реагируют на изменение плана деформаций, которое обусловлено изменением поля напряжений земной коры.

Для более точного определения места готовящегося сейсмического события применен метод скользящего окна, при котором производится более детальный линеаментный анализ локальных фрагментов космических изображений в районе предполагаемого землетрясения. Приведены результаты выявления эпицентральной зоны сильного землетрясения, произошедшего 28 сентября 2004г. в районе г. Паркфилд (магнитуда 6.0) в процессе оперативного космического мониторинга геодинамики Центральной и Южной Калифорнии.

Введение

Несмотря на высокий уровень развития современных методов прогноза землетрясений и большие затраты, вкладываемые в решение этой проблемы, эффективность такого прогноза остается весьма низкой [1-3]. В связи с этим актуальными становятся поиск новых предвестников и методов их регистрации, а также развитие теории прогноза землетрясений. Основные цели такого прогноза - определение места, интенсивности и времени возникновения землетрясений. Для решения этой задачи необходима разработка новых эффективных методов мониторинга предвестников землетрясений, создание адекватных моделей, описывающих эти предвестники и разработка эффективной стратегии прогноза землетрясений.

В настоящее время, наряду с традиционными методами мониторинга, используемыми в сейсмологии, разрабатываются и внедряются новые методы, в том числе космические [4-9]. Применение космических методов для контроля сейсмических территорий и их сочетание с наземными геофизическими методами позволяет существенно повысить эффективность прогнозирования значительных сейсмических событий. Одним из перспективных космических методов является метод оперативного анализа геодинамики сейсмоопасных территорий, связанный с регистрацией изменчивости систем линеаментов, выделяемых на спутниковых изображениях, предложенный в работах [6-8]. Возможность использования такого метода основана на предположении, что системы линеаментов тесно связаны с системами сейсмогенных нарушений и реагируют на изменение плана деформаций, которое обусловлено изменением поля напряжений земной коры [6,7].

В целях исследования возможностей использования данного метода для прогнозирования крупных землетрясений нами был осуществлен оперативный мониторинг тестового участка на территории Южной Калифорнии. В процессе мониторинга на исследуемом участке и вблизи него произошел ряд сейсмических событий, геодинамические предвестники которых были зафиксированы нами при помощи метода линеаментного анализа.

Организация мониторинга геодинамических предвестников землетрясений

Технологическая схема космического мониторинга геодинамических предвестников землетрясений представлена на рис.1. Первым этапом мониторинга таких предвестников является получение исходной космической информации, которая в реальном времени регистрируется антенными комплексами ЦПАМ

«АЭРОКОСМОС». В случае если исследуемая территория не попадает в зону приема антенных комплексов, получение информации происходит по сети Интернет с задержкой по времени.

Полученная космическая информация поступает в оперативную базу данных, где происходит ее архивация. После этого производится оценка качества и предварительная обработка данных. Этот этап включает в себя:

- контроль качества исходных изображений;
- оценку метеорологической обстановки;
- конвертирование исходных изображений в формат UTM с географической привязкой;
- сканирование исследуемой территории фрагментами изображений;
- выбор интересующих фрагментов.

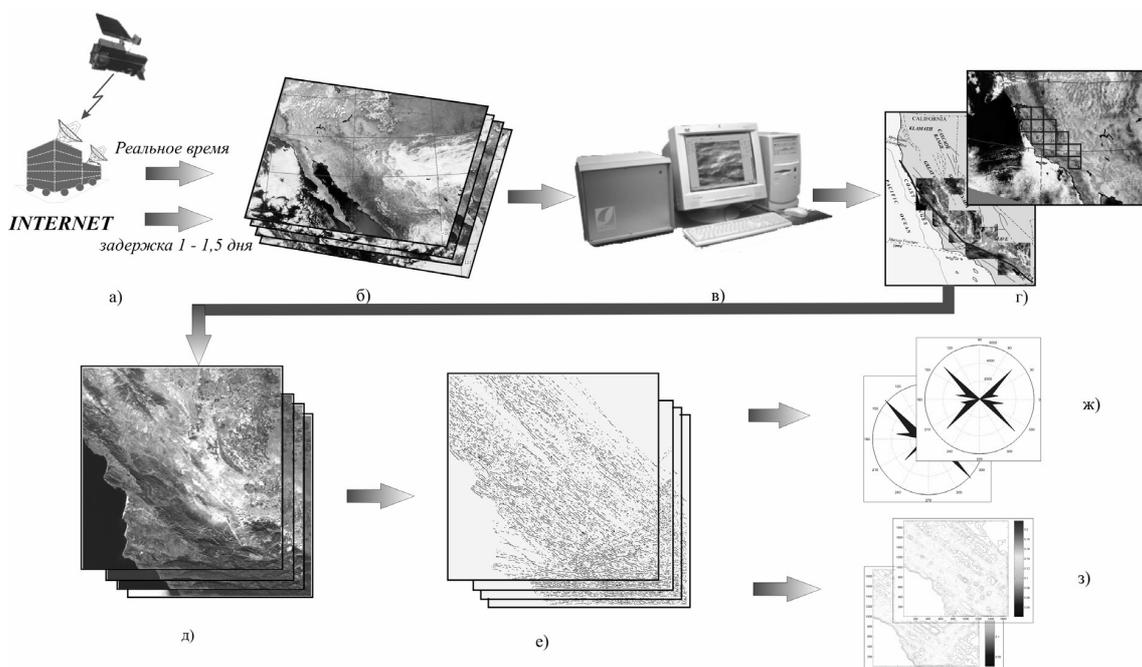


Рис. 1. Технологическая схема линейного анализа:

а - получение космической информации из различных источников; б - визуализация исходных космических изображений; в – архивация, конвертирование в формат GeoTIFF с географической привязкой в проекции UTM; г - сканирование исследуемой территории фрагментами; д - выбор фрагментов; е - построение схем линейных элементов; ж - построение роз-диаграмм направленностей линейных элементов; з - построение полей плотностей линейных элементов

Далее происходит автоматическое выделение линейных элементов по космическим изображениям, а затем осуществляется построение роз-диаграмм их направленности, полей плотностей и статистический анализ обнаруженных линейных элементов [6-10]. По результатам анализа роз-диаграмм и полей плотностей линейных элементов производится оценка геодинамической обстановки исследуемой территории, на основании которой осуществляется прогноз сейсмической обстановки.

Для организации мониторинга геодинамики были созданы базы данных космических изображений, полученных со спутника TERRA с помощью аппаратуры MODIS (спектральный диапазон 620 – 670 нм, пространственное разрешение 250 м). Необходимо отметить, что для линейного анализа использовались только безоблачные изображения, фрагменты которых точно попадали на исследуемый регион.

Для исследования геодинамики анализируемой сейсмоопасной территории обрабатывались не все изображения для областей Земной поверхности размерами $\sim 2500 \times 2250$ км², а их фрагменты, в которые входили также анализируемые тестовые участки. Координаты углов фрагментов изображений на каждый день проведения исследований были одинаковы.

Для каждого исследуемого участка сейсмоопасной территории выбирались фрагменты определенных размеров. Выбор размеров фрагментов изображений обусловлен особенностями дальнейшей обработки. Как правило, выбирались фрагменты размерами от 400×400 до 2000×2000 пикселей (от 100×100 км² до 500×500 км² в масштабе поверхности Земли).

Если размеры фрагментов будут больше, то полученные результаты будет сложно анализировать из-за малой точности определения эпицентральной зоны, а также наличия большого количества мелких особенностей, являющихся помехой. Если же размеры фрагментов будут значительно меньше, то возможна потеря некоторых линейных структур, что приведет к невозможности выделить главное направление линеаментов.

Оперативный космический мониторинг территории Южной Калифорнии

Оперативный мониторинг геодинамики сейсмоопасной территории Южной Калифорнии осуществлялся в период конец июля – середина ноября 2004 г. Космические изображения для анализируемой территории поступали на обработку через Internet с запаздыванием 1-1.5 суток. Обрабатывались только “безоблачные” изображения.

При оперативном мониторинге вначале производилась обработка фрагментов космических изображений, размером 1200×1600 пикселей (400×475 км²). Выбранные фрагменты соответствовали участку, на котором прогнозировалось сильное землетрясение. Затем проводилась детальная обработка более мелких фрагментов космических изображений размером 800×800 пикселей (200×200 км²) по методу скользящего окна [10].

Результаты линеаментного анализа космических изображений, полученные для исследуемого района в августе, сентябре и октябре 2004 г. приведены на рис.2. в виде роз-диаграмм направленности линеаментов. Анализ полученных роз-диаграмм, характеризующих геодинамическую обстановку в исследуемом регионе показывает, что линеаменты ведут себя крайне нестабильно во время всего периода наблюдений (см. рис. 2). Особенно наглядно это проявляется для секущих компонентов роз-диаграмм. Такое поведение линеаментов согласуется со сложной сейсмической обстановкой в исследуемом регионе. На рядах роз-диаграмм направленности линеаментов, приведенных на рис.2, стрелками указаны моменты землетрясений с $M \geq 3$, состоявшимися в исследуемом регионе.

Совместный анализ времени и места происхождения землетрясений и результатов линеаментной обработки космических изображений показал следующее:

1. Геодинамические особенности территории Южной Калифорнии проявлялись в неустойчивости плотности, направленности и относительного количества линеаментов, особенно секущих, направленных с северо-востока на юго-запад – приблизительно перпендикулярно направлению линеаментов, которые соответствуют главному разлому этого региона – разлому Сан – Андреас;

2. За 3 – 5 дней до землетрясений с $M \geq 4$ плотность секущих линеаментов значительно возрасла, достигая максимума (относительное количество $\sim 4000 - 5000$) в моменты этих землетрясений;

3. В периоды времени больше 3 – 5 дней до землетрясений и через 3 -5 дней после них количество секущих линеаментов существенно снижалось и соответствовало спокойному (фоновому) состоянию для этого региона;

4. Выявленная закономерность нарушалась только в моменты свершения более слабых сейсмических событий с $M \leq 3$;

5. Аномалии в поведении линеаментов (появление дополнительных секущих компонентов) проявляются и при сильных землетрясениях, произошедших вне исследуемого участка (землетрясение в г. Паркфилд $M = 6.0$, землетрясения состоявшиеся на северо-востоке от исследуемого участка с $M = 5.5$ и

$M = 5.4$), а также и при землетрясении произошедшем 29 сентября 2004 г. ($M = 5.0$) рядом с исследуемым участком;

Выявленные особенности поведения линеаментов в период подготовки и прохождения землетрясений могут быть использованы для средне-краткосрочного и краткосрочного прогноза землетрясений. Для выявления особенностей влияния более слабых землетрясений на поведение линеаментов требуется проведение дополнительных более тщательных исследований.

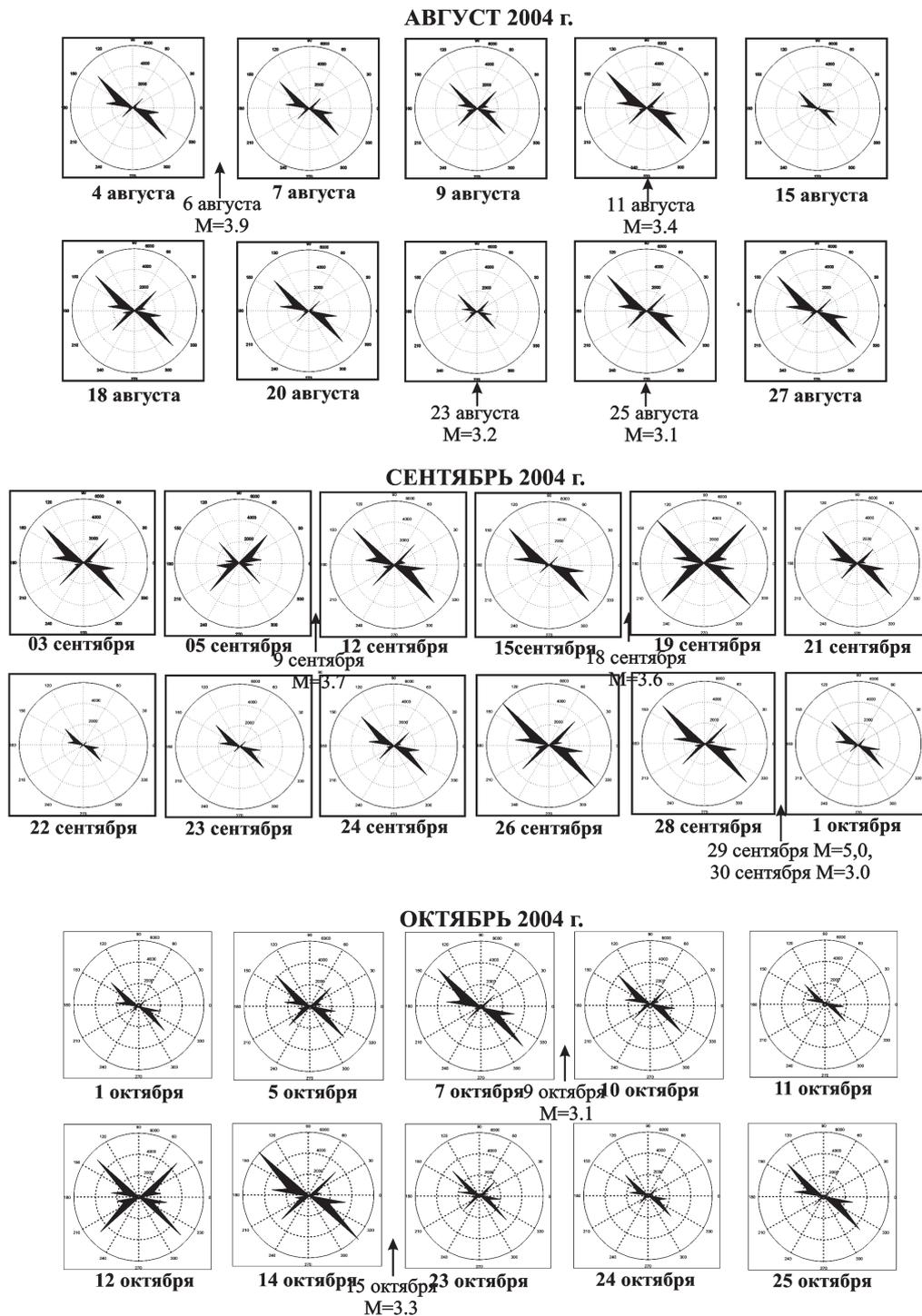


Рис. 2. Розы-диаграммы направленности линеаментов на территории Южной Калифорнии в период с августа по октябрь 2004 года

Исследование предвестников землетрясения в районе г.Паркфилд

Сильное землетрясение (магнитуда 6,0) произошло 28 сентября 2004г. к северо-востоку от г. Сан-Симеон в районе г. Паркфилд. Лето 2004г. отличалось повышенной сейсмичностью во всей южной части Калифорнии. Лишь в сентябре – начале октября произошло 17 сильных толчков с магнитудой 4.0–6.0. В один день иногда случалось по 2-4 сильных толчка. Ближайшие к толчку 28 сентября 2004 г. сильные землетрясения произошли 18 ($M = 5.4; 5.5$), 20 ($M = 4.8$), 29 ($M = 5.$), 30 ($M = 5.0$) сентября.

Ниже, в качестве примера, приведены результаты линеamentного анализа фрагментов изображений, размерами 800×800 пикселей ($200 \times 200 \text{ км}^2$), которые были получены на 21, 26, 28 сентября и 1 октября 2004 г. (см. рис.3). На этом рисунке на фоне тектонической карты Калифорнии представлены пространственные расположения анализируемых фрагментов космических изображений (A, B, B1, C, D, E, F), а также розы-диаграммы направленности линеamentов для этих фрагментов, полученные в разные дни. Эпицентр землетрясения, состоявшегося 28 сентября 2004 г. (Паркфилд), находится в центре фрагмента B.

На полученных в результате приведенной детальной обработки розах-диаграммах, как и в предыдущем примере, было выявлено два основных направления линеamentов: первое совпадает с простираем разлома Сан-Андреас (направление северо-запад – юго-восток), второе является ортогональным направлению разлома Сан-Андреас.

Розы-диаграммы для всех представленных фрагментов ведут себя сходно – 21 сентября 2004 г. количество линеamentов обоих направлений минимально. 26 сентября 2004 г. (за два дня до землетрясения) оно увеличивается, 28 сентября 2004 г. на некоторых фрагментах оно начинает уменьшаться, а на фрагментах C, D и F оставалось прежним. Это связано с тем, что в пределах фрагмента C находился эпицентр землетрясения, состоявшегося 29 сентября 2004 г. (магнитуда 5.0), а фрагменты D и F расположены рядом с ним.

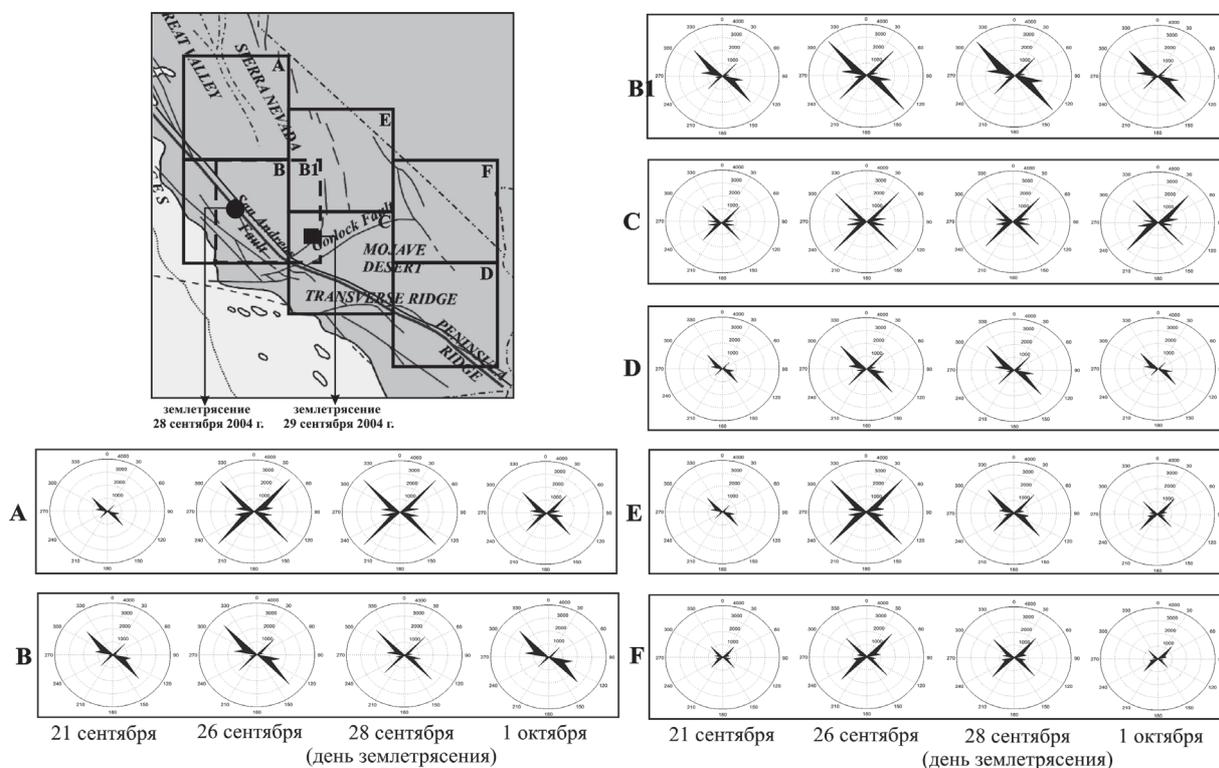


Рис. 3. Детальный линеamentный анализ фрагментов космических изображений для землетрясений 28 сентября 2004 г. ($M=6.0$) и 29 сентября 2004 г. ($M=5.0$)

Наибольшее количество продольных линеаментов выявлено для фрагментов В и В1. Это вполне закономерно, т.к. разлом Сан-Андреас полностью пересекает эту часть исследуемой территории и внутри этих фрагментов располагаются эпицентры землетрясений, состоявшихся 28 сентября (магнитуда 6.0) и 29 сентября 2004 г. (магнитуда 5.0).

В целом для всех проанализированных фрагментов космических изображений подтверждается выявленная в работах [7-11] закономерность: рост количества и размеров секущих и поперечных линеаментов к моменту начала землетрясения и их уменьшения после него.

Использование метода скользящего окна для линеаментного анализа космических изображений позволяет более точно выявить местоположение эпицентральной зоны готовящегося сейсмического события.

Заключение

На основании проведенных исследований показано, что автоматизированный линеаментный анализ космических изображений обладает большой достоверностью, оперативностью и эффективностью для геодинамического мониторинга сейсмоопасных территорий.

Сейсмический мониторинг, осуществляемый на основе такого анализа, может позволить прогнозировать не только время, но и место землетрясения. Для этого необходимо исследовать всю сейсмоопасную зону по методу скользящего окна, т.е. дешифровать взаимоперекрывающиеся участки (фрагменты космических изображений) на всем протяжении сейсмических разломов.

Предложенный метод изучения динамики систем линеаментов по космическим изображениям, совместно с другими методами, может использоваться для оперативного мониторинга сейсмоопасных территорий с целью исследования и прогноза значительных сейсмических событий.

Литература

1. *Соболев Г. А.* Основы прогноза землетрясений // М.: Наука, 1993. 313 с.
2. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
3. *Федотов С. А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги // М.: Наука, 2005. 302 с.
4. *Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л.* Ионосферные предвестники землетрясений // М.: Наука, 1992. 304 с.
5. *Гохберг М.Б., Моргунов В.А. и др.* Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений // М.: ИФЗ, 1985. 116 с.
6. *Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук, 2005. Т. 402, №5. С.675-679.
7. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Докл. Академии наук, 2005. Т. 402. № 1. С. 98-105.
8. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2005. № 1. С. 76-83.
9. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исследование Земли из космоса, 2005. № 3. С. 37-52.
10. *Бондур В.Г., Зверев А.Т., Кузнецова Л.В.* Космический мониторинг динамики систем линеаментов в период подготовки землетрясений в Калифорнии // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2005. № 5. С. 47-55.
11. *Bondur V.G., Kuznetsova L.V.* Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using The Method of Lineament Analysis // Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. St.Petersburg, 2005.