



Тема лекции 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Вопросы:

- 5.1. Использование данных дистанционного зондирования в агромониторинге.**
- 5.2. Мониторинг использования земель для целей землеустройства и кадастров.**
 - 5.2.1. Дешифрирование границ сельскохозяйственных земель**
 - 5.2.2. Деградация сельскохозяйственных земель**
- 5.3. Определение почвенных индексов.**
- 5.4. Определение температуры поверхности почвы.**
- 5.5. Мониторинг снежного покрова.**
- 5.6. Использование данных дистанционного зондирования в экологическом мониторинге.**
- 5.7. Мониторинг лесных насаждений.**
- 5.8. Мониторинг пожаров в природных экосистемах.**
- 5.9. Мониторинг загрязнения водных объектов.**

Литература

1. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие / О. С. Токарев. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 148 с. ()
2. Жиленев М. Ю. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке / М. Ю. Жиленев // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 56–64. ()
3. Сухих В. И. Аэрокосмические методы исследования в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве / В. И. Сухих. – Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2005. – 392 с. (1,2,3,4,5)
4. Петин, А.Н. Геоинформатика в рациональном недропользовании /А.Н. Петин, П.В.Васильев – Белгород: Изд-во БелГУ, 2011. – 268 с. (1, 4, 5)
5. Кравцова В.И. Космические методы картографирования почв /Учеб. пособие для студентов вузов / В. И. Кравцова. — М.: Аспект Пресс, 2005. — 190 с (1,2,5)
6. Беляев Б.И. Оптическое дистанционное зондирование / Б.И. Беляев, Л.В. Катковский// Минск: БГУ. 2006 –455 с. (1,2, 5).
7. Козодеров В.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного зондирования. Учебное пособие. М.: МФТИ, 2008 – 222 с. (2,3,5)
8. Гарбук СВ., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. — М.: Издательство А и Б, 1997. — 296 с, ил.
9. Сутырина Е. Н. Дистанционное зондирование земли : учеб. пособие /Е. Н. Сутырина. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с. (1,2,5)

Вопрос 5.1. Использование данных дистанционного зондирования в агромониторинге

Сельское хозяйство самая главная, основная и востребованная экономика в мире. Ничего нет важнее для Человека, как быть накормленным и быть выжившим. Все остальное вторично.

Мировая инфраструктура сельского хозяйства разбросанная и неоднородная, от приусадебных мелких участков, фермеров до средних и крупных агропромышленных предприятий. И вся она, так или иначе, зависит от климата и природных условия жизни человека на земле.

Технология существования производства продуктов питания вращается в ежегодном круговороте от ручной работы до высокотехнологичной современной машинной обработки земли.

Основные проблемы сельского хозяйства концентрируются на аксиоме жизни: вода, засуха, погода, вредители, плодородие почвы.

Развитие сельского хозяйства является одним из самых мощных инструментов, позволяющих искоренить крайнюю нищету, повысить общее процветание и накормить прогнозируемые 9,7 миллиарда человек к 2050 году.

Рост в сельскохозяйственном секторе в два-четыре раза более эффективен для повышения доходов беднейших слоев населения по сравнению с другими секторами. Анализы, проведенные в 2021 году, показали, что 65% бедных работающих взрослых зарабатывают на жизнь сельским хозяйством. Сельское хозяйство также имеет решающее значение для экономического роста: в 2018 году на него приходилось 4% мирового валового внутреннего продукта (ВВП), а в некоторых наименее развивающихся странах оно может составлять более 25% ВВП.

На государственном уровне в большинстве стран продовольственная безопасность, конечный продукт сельского хозяйства, является приоритетной задачей. Понятно, что в первую очередь, надо говорить о странах Африки и Азии.

В этом аспекте, технология дистанционного зондирования, не просто вспомогательная технология, а принципиально решающая задачу урожайности съедобных культур сельского хозяйства..

Процесс дистанционного зондирования в сельском хозяйстве основан на информации, собранной различными аэрокосмическими устройствами за определенный период. Собранные данные затем можно использовать для анализа различных аспектов целевой задачи сельского хозяйства: урожая и урожайности.

Анализ данных ДЗЗ используется для внесения изменений в состав возделываемых культур, чтобы обеспечить максимальную эффективность отрасли.

Самыми распространенными угрозами, с которыми сталкиваются сельхозпроизводители, являются заражение сельскохозяйственных культур вредителями и сорняками. Здесь требуется переход от космической съемки до съемки с БПЛА и полевого подтверждения. Реально сегодня ДЗЗ в сельском хозяйстве может помочь обнаружить их на ранней стадии и предупредить о необходимости принятия необходимых контрмер для обеспечения здоровья сельскохозяйственных культур.

Использование спутниковых изображений в сельском хозяйстве помогает охватить обширную площадь земли и может помочь в проверке состояния посевов.

В целом, основными темами ДЗЗ в сельском хозяйстве следует определить:

1. Классификация пригодности земли. Инвентаризация сельскохозяйственных участков (кадастр).
2. Охрана почвенных ресурсов, оценка земель и планирование землепользования.
3. Стихийные бедствия (наводнения, засухи, пожары, оползни и т.д.).
4. Пространственное цифровое управление фермами и сельскохозяйственными угодьями.
5. Точное земледелие, интеллектуальное земледелие и сбор данных с помощью пространственных цифровых технологий.
6. Сельскохозяйственное производство и мониторинг агроэкосистем.
7. Защита растений, борьба с вредителями и болезнями.
8. Сорняки.
9. Инвазивные виды.
10. Питательные вещества почвы и управление плодородием, удобрения.
11. Управление животноводством и пастбищами.
12. Картирование земель по данным мониторинга за десятилетия.

Развитие новых технологий для сбора пространственных данных — беспилотные летательные аппараты, цифровые камеры, спутниковые данные, индикационные датчики и многое другое — их анализ с помощью ГИС обеспечивают расширенные возможности для решения современных проблем, стоящих перед сельским хозяйством, а также экологической устойчивостью, в конечном счете продовольственной безопасностью.

Приоритетными новыми технологическими направлениями ДЗЗ в сельском хозяйстве можно определить:

- Технологии фенотипирования для скрининга устойчивости, селекции сельскохозяйственных культур и точного земледелия.
- Технология спектральной визуализации с БПЛА для обнаружения болезней сельскохозяйственных культур.
- Получение биофизических параметров сельскохозяйственных культур с использованием данных дистанционного зондирования.
- Оценка коэффициентов урожая и эвапотранспирации с помощью дистанционного зондирования.
- Точное земледелие с использованием гиперспектральных изображений.
- Математическое моделирование и алгоритмы моделирования роста растений (над и под землей) на основе бесконтактных изображений.
- Приложения глубокого и машинного обучения в данных дистанционного зондирования для мониторинга и управления посевами с использованием систем точного земледелия.

- Сельскохозяйственный мониторинг в режиме, близком к реальному времени.
- Дистанционное зондирование фотосинтеза с помощью индуцированной солнцем флуоресценции хлорофилла и индекса фотохимического отражения.
- Проксимальное и дистанционное зондирование для точного управления посевами.
- Цифровое сельскохозяйственное производство на основе технологий дистанционного зондирования, приложений искусственного интеллекта и робототехнических систем.
- Синергия аэрокосмических изображений и искусственного интеллекта для сельского хозяйства.
- Модели эвапотранспирации на основе дистанционного зондирования.
- 3D-моделирование и картографирование для точного земледелия.

Преимущества мониторинга сельскохозяйственных земель с использованием данных ДЗЗ:

- оперативность — актуальные фото из космического пространства готовы уже через несколько дней после оформления заявки;
- объективность — полученные из аэрокосмическая информация отличается достоверностью, отражает настоящую картину состояния почвы, растительности;
- единовременность, периодичность — спутники и БПЛА позволяют делать съемку детального разрешения с частой периодичностью;
- единообразие — информация поступает с откалиброванных сенсоров, необходимость в проведении дополнительной обработки, преобразованиях отсутствует;
- обзорность — современные спутники позволяют делать снимки площадей, за счет чего достигается единовременность наблюдения в зонах, находящихся на большом расстоянии друг от друга;
- решение большого количества прикладных задач в сельскохозяйственной сфере.

Вопрос 5.2. Мониторинг использования земель для целей землеустройства и кадастров.

Сельскохозяйственными землями называются земельные участки, планомерно и систематически используемые для производства сельскохозяйственной продукции. К сельскохозяйственным землям относятся пахотные, залежные, луговые, земли под многолетними насаждениями (садами, виноградниками и другими).

Спутниковые данные успешно используются при решении нескольких основных задач мониторинга и оценки состояния сельхозземель:

1. Определение границ и типов сельскохозяйственных земель (инвентаризация). Для решения этой задачи ключевое значение имеет высокое пространственное разрешение и геометрическая точность снимков. Однако сельхозземли занимают обширные площади - в некоторых регионах до 60-

80% от всей территории. Поэтому для дешифрирования границ и типов земель чаще используются данные со спутников, обеспечивающих достаточно широкую полосу съемки (от 30-40 км и более), как например SPOT-6/7 (Франция) или Ресурс-П (Россия), актуальные за текущий или предшествующий сезон.

2. Определение текущего состояния, типа использования сельскохозяйственных земель, выявление неиспользуемых и зарастающих участков, а также случаев нецелевого использования. Эти задачи могут быть решены по общедоступным снимкам среднего пространственного разрешения Landsat-8 и Sentinel 2A/2B.

3. Выявление и оценка степени деградации сельскохозяйственных земель вследствие воздействия природных или антропогенных факторов. В данном случае выбор данных зависит от особенностей исследуемых процессов и территории. Например, для мониторинга захламливания или незаконного строительства на сельскохозяйственных землях требуются снимки более высокого пространственного разрешения, чем для оценки ущерба от пожаров и других опасных природных явления.

Для решения всех перечисленных задач принципиальное значение имеет сезон съемки - необходимо использовать снимки беснежного периода.

Для визуального анализа состояния сельскохозяйственных земель наиболее репрезентативными являются варианты синтеза с использованием ближнего инфракрасного спектра. Например, изображения в комбинации каналов NIR-RED-GREEN или GREEN-NIR-RED являются достаточно контрастными и позволяют наиболее достоверно отделить открытую почву от развивающихся всходов и проанализировать их состояние. На рис. 5.1 отображена одна и та же территория в естественной цветопередаче и в комбинации каналов GREEN-NIR-RED. Здоровая растительность в комбинации каналов GREEN-NIR-RED выглядит ярко-зеленой, а почва без растительности - в оттенках фиолетового. Также можно использовать синтез каналов SWIR-NIR-RED и натуральный цветовой синтез RED-GREEN-BLUE.



Рис 5.1. Отображение пашни с посевами сельскохозяйственных культур в разной стадии вегетации на снимке Sentinel—2B: а) в натуральной цветопередаче (RED-GREEN-BLUE); б) в искусственной цветопередаче (GREEN-NIR-RED).

Вопрос 5.2.1. Дешифрирование границ сельскохозяйственных земель

Контурами сельскохозяйственных земель часто служат полевые дороги - узкие прямые или извилистые светло-серые линии (в комбинации каналов «естественные цвета»). Полевые дороги, хозяйственные постройки, другие антропогенные объекты, водные объекты, необрабатываемые эродированные участки, а также участки зарастания древесно-кустарниковой растительностью, в том числе небольшие группы кустарников, исключаются из контура поля и не входят в его площадь. Пример дешифрирования границ земель представлен на рис. 5.2. При дешифрировании необрабатываемых участков полей важно изучить разновременные данные ДЗЗ, так как отдельные участки полей могут распахиваться в разные сезоны.



Рис. 5.2. Пример выделения границ сельскохозяйственных земель по снимку SPOT-6, синтез каналов GREEN-NIR-RED

Полученные контуры сельскохозяйственных земель корректируются в соответствии с актуальным севооборотом по космическим снимкам среднего и/или низкого пространственного разрешения. Для выявления изменения границ сельскохозяйственных земель и границ землепользования могут использоваться архивные снимки.

Зарастание сельскохозяйственных земель древесно-кустарниковой растительностью можно идентифицировать по зернистой текстуре изображения, наличию на поле хаотично расположенных «пятен», отсутствию структурированности в распространении растительности, отсутствию резких цветовых переходов, связанных с распашкой земли и уборкой урожая. По архивным данным среднего пространственного разрешения можно выявить, подвергалось ли поле вспашке, и выявить возраст зарастания,

насколько это возможно по наличию данных.

Ниже рассмотрены дешифровочные признаки различных видов сельскохозяйственных земель и примеры дешифрирования на материалах космической съемки.

Пахотные земли (пашни) Пашня - самые ценные и продуктивные земли. К пашне относятся земли с наиболее плодородными почвами, систематически обрабатываемые и используемые под посевы сельскохозяйственных культур. Помимо полей с культурными растениями, в эту группу включены посевы многолетних трав на участках севооборота, выводные поля и чистые пары. К пашне не относят распаханное с целью коренного улучшения сенокосы и пастбища, а также используемые под посевы междурядья садов.

На материалах космической съемки пахотные земли обладают довольно четкими границами, имеют определенную «геометричность» формы и однотонность внутри отдельного поля (рис 5.3). Чаще всего поля имеют прямоугольную форму, ограниченную четкими линейными контурами (бровками оврагов, дорогами, лесополосами). Для определенных периодов съемки достаточно информативным признаком пашни является текстура изображения, но она неустойчива во времени. В зависимости от пространственного разрешения космического снимка, возможно выявить наличие характерных полос (следов распашки), борозд от обработки почвы. Тон и цвет пашни также может варьироваться в большом диапазоне. Он изменяется в зависимости от типа почвы и характера ее обработки, состояния данного участка, произрастающей на нем культуры, фазы развития этой культуры, густоты и состояния растений и др. Пашни могут быть самого различного цвета, поэтому нельзя считать цвет однозначным и достаточным дешифровочным признаком.

Свежевспаханную почву в синтезе каналов GREEN-NIR-RED можно отличить по яркому темно-фиолетовому цвету. Это поля, которые незадолго до съемки прошли некоторую обработку - распашку или рекультивацию, т.е. почва более или менее увлажненная. Сухая почва выглядит на снимке светло-фиолетовой и сиреневой (синтез каналов GREEN-NIR-RED). На снимках высокого разрешения могут быть видны борозды, оставленные после обработки почвы сельскохозяйственной техникой. На рис. 5.3 (г) можно увидеть поля различных оттенков зеленого цвета, соответствующих разным стадиям вегетации сельскохозяйственных культур. Чем ярче и насыщенней зеленый цвет, тем больше биомасса растений и выше в ней содержание хлорофилла, дающего этот зеленый цвет. Помимо влажности почвы, на тон изображения влияет содержание гумуса, непосредственно тип почвы, гранулометрический состав, наличие сухих остатков растений и т.д.

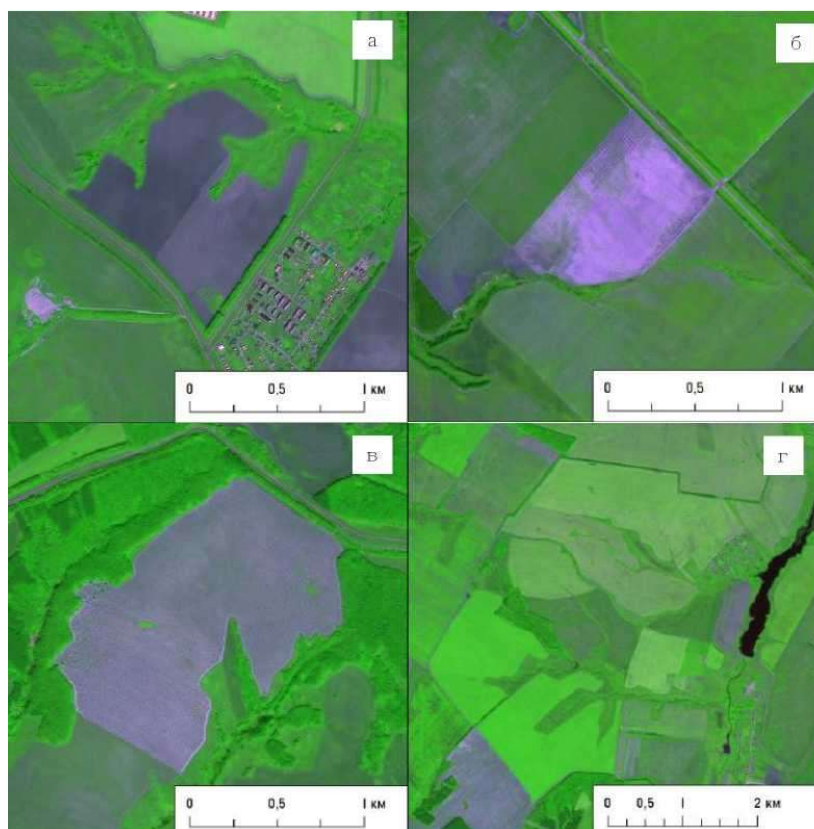


Рис. 5.3. Изображение пашни на снимке SPOT—7, синтез каналов GREEN—NIR—RED: а) свежевспаханная почва; б) сухая почва; в) вспаханная почва со следами движения сельскохозяйственной техники; г) пашни с растительностью в различных стадиях вегетации.

В комбинации каналов NIR-RED-GREEN (рис. 5.4) растительность имеет красные оттенки, поскольку сильно отражает инфракрасное излучение, и в данном синтезе НК присвоен красный цвет. Здоровая растительность, которая находится в активной стадии вегетации, отражает больше инфракрасного излучения, поэтому она выглядит ярко-красной. Чем больше проективное покрытие растительного покрова и содержание хлорофилла, тем ярче красный оттенок. Цвет открытой почвы варьируется от темно- до светло-зеленого. Заболоченные, переувлажненные земли выглядят темнее из-за высокого содержания влаги.

Наиболее вероятные ошибки дешифрирования пашни: отнесение некоторых участков пашни к залежи и наоборот, а также отнесение к пашне сенокосов и пастбищ, распахиваемых с целью коренного улучшения.

Многолетние насаждения - земельные участки, занятые древесными, кустарниковыми или травянистыми искусственными насаждениями, предназначенными для получения плодово-ягодной, лекарственной или технической продукции (чая, эфирных масел, хмеля и пр.). К многолетним насаждениям относят сады, виноградники, ягодники, тутовники, плантации чайных и эфирномасличных культур, плодовые питомники и др.

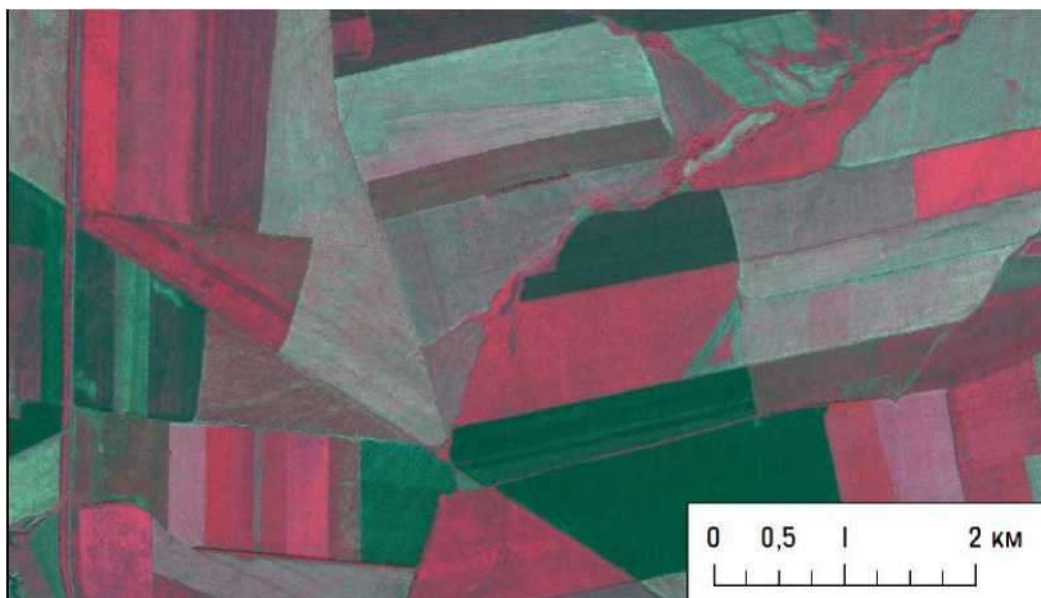


Рис. 5.4. Изображение пашни на снимке SPOT-6, синтез каналов NIR-RED-GREEN.

В целом для уверенного дешифрирования многолетних насаждений требуется использовать снимки сверхвысокого пространственного разрешения, поскольку наиболее информативным признаком является рисунок изображения. Спектральные признаки менее значимы, поэтому в данном разделе приведены примеры снимков только в синтезе естественных цветов. Установить вид многолетнего насаждения зачастую можно только при наличии дополнительной информации о характере произрастающих культур (высота, ширина междурядий, зональность и т.п.) или путём непосредственного наблюдения в натуре.

Сады и плодпитомники имеют правильную геометрическую форму, как правило, прямоугольную или квадратную, и занимают небольшую площадь. Внутри контура участка четко прослеживается сетчатая структура насаждений. В большинстве случаев можно видеть отдельно стоящие деревья (рис. 5.5).

Структура изображения многолетних насаждений характеризуется однотипным сетчатым или прямоугольным рисунком, четким контуром (забор, дорога). Так, виноградники дешифрируются по крупным массивам, разбитым на отдельные, как правило, вытянутые участки. Насаждения имеют полосчатую структуру, так как кустарники высаживаются рядами, которые просматриваются на снимках сверхвысокого пространственного разрешения. На рис. 5.6 показаны крупные массивы виноградников правильной геометрической формы.



Рис. 5.6. Питомник семечковых культур. Снимок сверхвысокого разрешения с открытого картографического сервиса



Рис. 5.6. Виноградники. Снимок сверхвысокого разрешения с открытого картографического сервиса

Луговые земли (сенокосы и пастбища).

Сенокосы - это земельные участки с травостоем, который используется для заготовки сена, сенажа и травяной муки. Для сенокосов характерна приуроченность к поймам рек (заливной сенокос), а также к сухим балкам и склонам водоразделов (суходольный сенокос). Текстура изображения изменяется в зависимости от качественных характеристик сенокосов.

Пастбища - это земельные участки, систематически используемые для выпаса скота, а также участки, не являющиеся сенокосом и залежью, растительность которых пригодна на корм скоту.

Форма участков сенокосов и пастбищ в отличие от пашни неопределенная, с нечеткими границами. Сенокосы и пастбища ограничены извилистыми контурами (бровки балок, реки, дороги, граница леса), которые могут меняться от года к году. Размеры участков обычно значительно меньше, чем под пашню. Сенокосы и пастбища чаще всего приурочены к речным поймам и излучинам рек, а также к склонам горных хребтов. На территории участков может встречаться довольно большое количество отдельно стоящих деревьев, кустарников и их групп. На сенокосах, как и на пашне, прослеживается полосчатая структура, но менее отчетливая.

Изображение пастбищ, сенокосов и залежей сходно между собой, что вызывает трудности их выявления (рис. 5.7). Распознать тип земель можно по ряду косвенных признаков, которые лучше отображаются на снимках сверхвысокого пространственного разрешения. Для сенокосов такими признаками являются полосчатые следы сенокосения, стога сена. Пастбища приурочены к населенным пунктам. В местах с возможностью прогона скота к пастбищному участку можно наблюдать множество выбитых скотом троп, вытопанных у водопоев и на местах стоянок, наличие специальных сооружений - загонов, навесов и т. п. (рис. 5.8).



Рис. 5.7. Сенокосы на снимках SPOT—6/7 в синтезе естественных цветов

Сенокосы могут быть приурочены к определенным природным комплексам, участкам, где отсутствует возможность прогона скота и отсутствуют признаки систематического выпаса. Но при этом часто одно поле выполняет функцию сенокоса и пастбища одновременно. Также при дешифрировании следует учесть, что сенокосы и пастбища могут быть в значительной степени покрыты древесно-кустарниковой растительностью.



Рис. 5.8. Пастбища с загонами для скота и выбитыми тропами. Снимок сверхвысокого разрешения с открытого картографического сервиса

Залежные земли (залежь)

К залежам относятся земли, которые использовались под пашню в прошлом, однако в настоящее время не используемые под посевы сельскохозяйственных культур, не подготовленные под пар и заросшие естественной растительностью (рис. 5.9).



Рис. 5.9. Примеры залежи (На рисунке слева - часть счищено зарастающей древесноц растительностью) на снимках SPOT—6 в синтезе естественных цветов

Дешифровочные признаки залежей на ранних стадиях близки к пашне. Границы и следы обработки почвы и соответственно линейная текстура изображения сохраняются многие годы. Однако со временем появляются признаки прекращения обработки — локальная нечеткость текстуры, возникновение в текстуре неоднородно расположенных пятен (зерен отображения сорняков и древесной растительности). Косвенный признак залежи — приуроченность ее к межотроговым овражным и балочным участкам, к

сильно эродированным участкам, к опустевшим населенным пунктам. При очевидном зарастании поля древесно-кустарниковой растительностью его относят к заброшенным угодьям, а не к залежам.

Для достоверного дешифрирования залежей необходимо использовать несколько одновременных космических снимков, чтобы убедиться в том, что это поле периодически вводилось в оборот. Это позволяет отличить залежь от пара (когда вспаханное поле оставляют незасеянным только на один сезон). Если поле не засеивается более одного года, начиная с осени, то оно становится залежью.

Вопрос 5.2.2. Деградация сельскохозяйственных земель

Деградация земель сельскохозяйственного назначения - это совокупность процессов, приводящих к устойчивым негативным изменениям их состояния, количественному и качественному ухудшению свойств земель, снижению плодородия.

Деградация земель представляет одну из важнейших природных и социально-экономических проблем, которая создает угрозу экологической, экономической и в целом национальной безопасности страны. Водная и ветровая эрозия, подтопление, локальное переувлажнение, засоление, осолонцевание, захламление отходами производства и потребления, загрязнение как следствие экстенсивного землепользования наносят огромный ущерб продуктивному потенциалу земельного фонда России.

Для тематического дешифрирования негативных процессов и явлений, приводящих к деградации сельскохозяйственных земель, используются данные спутниковой съемки среднего и высокого пространственного разрешения. Используются те же комбинации каналов, как при дешифрировании сельскохозяйственных земель. Также необходимо учитывать сезон съемки. Так, для дешифрирования проявлений линейной эрозии могут быть весьма информативны снимки, полученные при низком угле освещения Солнцем, т.е. поздней осенью или зимой. Космические снимки, полученные в период снеготаяния, также информативны для дешифрирования линейной эрозии, т.к. в эрозионных ложбинах снег задерживается дольше, чем на полях. Для выявления большинства других процессов деградации сельхозземель необходимо использовать снимки, полученные в течение вегетационного периода.

Цветовой синтез с ближним инфракрасным каналом лучше всего подходит для мониторинга состояния растительности, дренажа и почвенной мозаики, выявления негативных процессов на территории сельскохозяйственных полей, так как при таком синтезе возрастает контрастность изображения растительности и открытой почвы.

Важным вспомогательным средством при дешифрировании негативных природных процессов является цифровая модель рельефа (ЦМР). Часто ЦМР и рассчитанная на ее основе крутизна склонов используются при дешифрировании как дополнительный слой. ЦМР, находящиеся в открытом доступе (с размером ячейки 30-90 м) позволяют успешно выявлять негативные процессы на сельскохозяйственных угодьях.

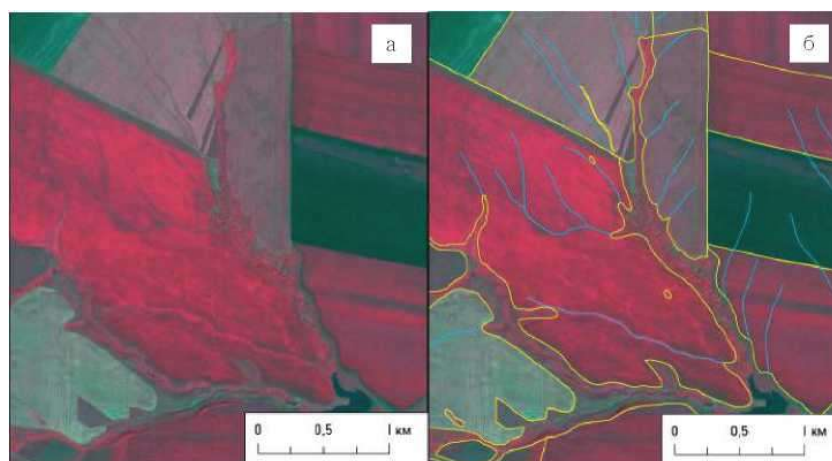


Рис. 5.11. Эрозионная сеть: а) фрагмент космического снимка SPOT—6 в синтезе каналов NIR—RED—GREEN; б) тот же фрагмент с элементами дешифрирования линейной эрозии. Желтые контуры - границы полей.



Рис. 5.12 Задержание снега в эрозионной сети в период весеннего снеготаяния (желтым цветом выделены контуры полей). Снимок Sentinel—2A от 12.04.2019.



Рис. 5.13. Участки эрозии на снимке SPOT—6 в синтезе каналов NIR—RED—GREEN: а) распаханнные; б) выведенные из сельскохозяйственного оборота. Желтыми контурами обозначены границы полей

При дешифрировании также стоит учитывать угол наклона склонов, так как чем круче уклон, тем выше скорость течения воды по поверхности и лучше условия для развития эрозионной сети. На рис. 5.14 (а) отображена система параллельных друг другу ложбин на склоне. На рис. 5.14, (б) показаны углы наклона склонов для этого же участка.

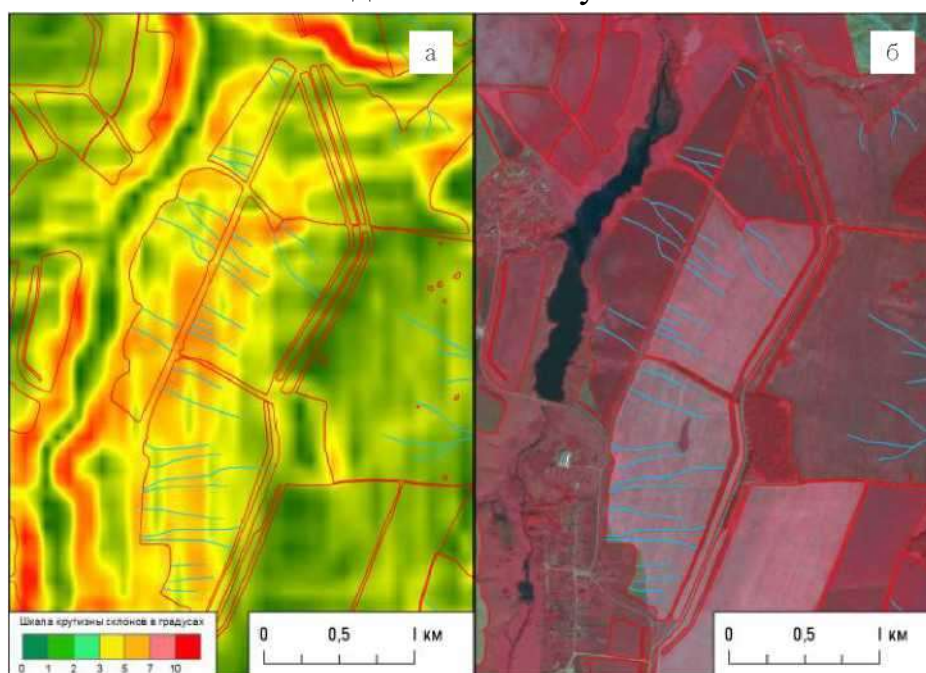


Рис. 5.14. Линейная эрозия на склонах: а) космический снимок SPOT—6 в синтезе NIR—RED—GREEN; б) карта крутизны склонов. Красные контуры - границы полей, синие линии - эрозионная сеть

Плоскостная эрозия (плоскостной смыв) - это равномерный смыв верхних, наиболее плодородных горизонтов почвы дождевыми, тальными или поливными водами, стекающими по меняющимся микроруслам или образующими сплошную водную пленку. Плоскостной смыв является основным механизмом переноса вещества по склонам, их выполаживания.. Под плоскостной эрозией обычно понимают тесно связанные между собой капельный, плоскостной и мелкорытвинный смыв.

В зону развития плоскостной эрозии попадают склоны крутизной от 2° , прилегающие к руслам постоянных водотоков (в пределах надпойменных террас), или к оврагам и балкам. Часто плоскостной смыв наблюдается в зоне активного развития линейной эрозии, когда поле пересекают параллельные друг другу промоины (рис. 5.15). Также может возникать на небольших возвышенностях (рис. 5.16).

Проявления плоскостной эрозии имеют вид осветленных относительно основного фона почвенного покрова пятен или волнистых полос, которые наиболее четко дешифрируются при отсутствии вегетации. Для более качественного их дешифрирования рекомендуется использование съемки высокого разрешения. Участки развития плоскостной эрозии обычно значительны по площади (от нескольких га). Светлые пятна участков со смытым верхним слоем почвы расположены сравнительно равномерно по всей площади развития негативного процесса.

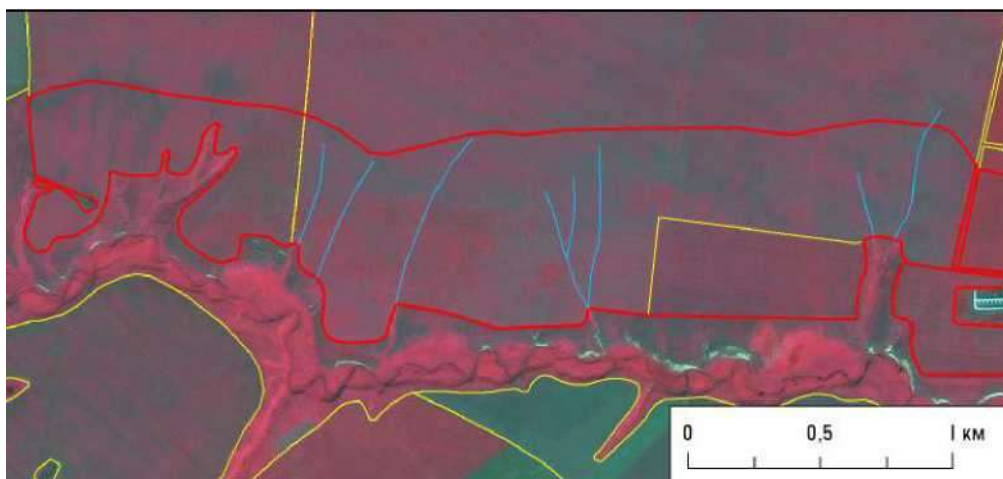


Рис. 5.15. Отображение плоскостного смыва почв на снимке SPOT—6 в синтезе каналов NIR—RED—GREEN. Красный контур - область развития плоскостной эрозии на склоне, синие линии - эрозионная сеть

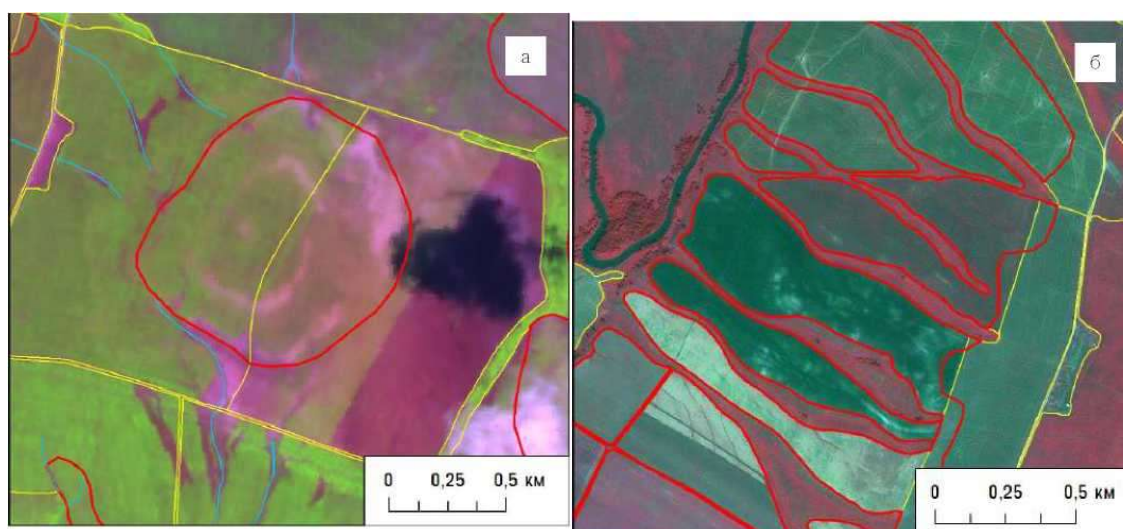
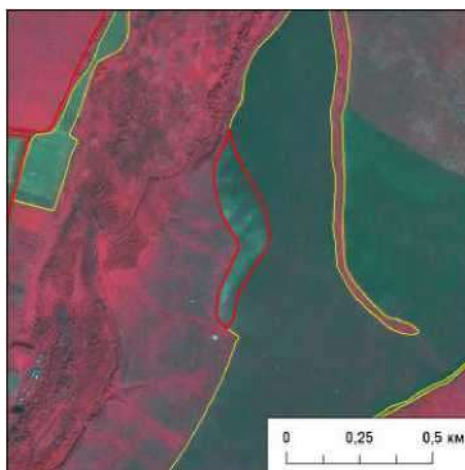


Рис. 5.16. Плоскостная эрозия: а) на холме; б) в зоне овражнобалочной сети, приуроченной к пойме реки. Желтыми линиями показаны границы полей, красными - участки полей, подверженные развитию плоскостного смыва.

На первых стадиях плоскостной смыв малозаметен и проявляется только при обнажении нижних, более светлых почвенных горизонтов. К зонам риска развития данного негативного процесса можно отнести все распаханые склоны (рис. 5,17). Интенсивность смыва определяется совокупностью различных факторов: количеством атмосферных осадков и их интенсивностью, плотностью защитного растительного покрова, способностью почв к поглощению и фильтрации воды, механическим составом почв и грунтов, крутизной и длиной склона.



Р и с . 5.17. Участок поля, приуроченный к пойме реки, с уклоном до 5°. Красным контуром в центре снимка выделен участок с активным развитием плоскостной эрозии, осветленный относительно общего фона распаханной почвы

Вопрос 5.3. Определение почвенных индексов.

Общей особенностью сухих почв разной генетической принадлежности, а также многих типов почвообразующих горных пород является монотонный рост коэффициентов спектральной яркости с увеличением длины волны в диапазоне от 0,4 до 2 мкм (рис. 3.2.1). При этом можно выделить два признака, позволяющие отличить открытую почву или грунт от участков, покрытых сухой растительностью или имеющих проективное покрытие вегетирующей растительностью менее 50%.

- Сравнительно низкие значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (для разных типов почв характерные значения NDVI лежат в диапазоне от 0,05 до 0,2)

- Высокий коэффициент спектральной яркости в среднем ИК диапазоне, который обратно зависит от влажности поверхности. Также для открытой почвы характерно значительное превышение яркости в среднем ИК диапазоне над яркостью в ближнем ИК диапазоне.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) представляет собой простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Этот один из самых распространенных индексов для получения количественных оценок растительного покрова, вычисляется по известной формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

где *NIR* - отражение в ближней инфракрасной области спектра, *RED* - отражение в красной области спектра

Таким образом, плотность растительности в каждом пикселе изображения равна разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей.

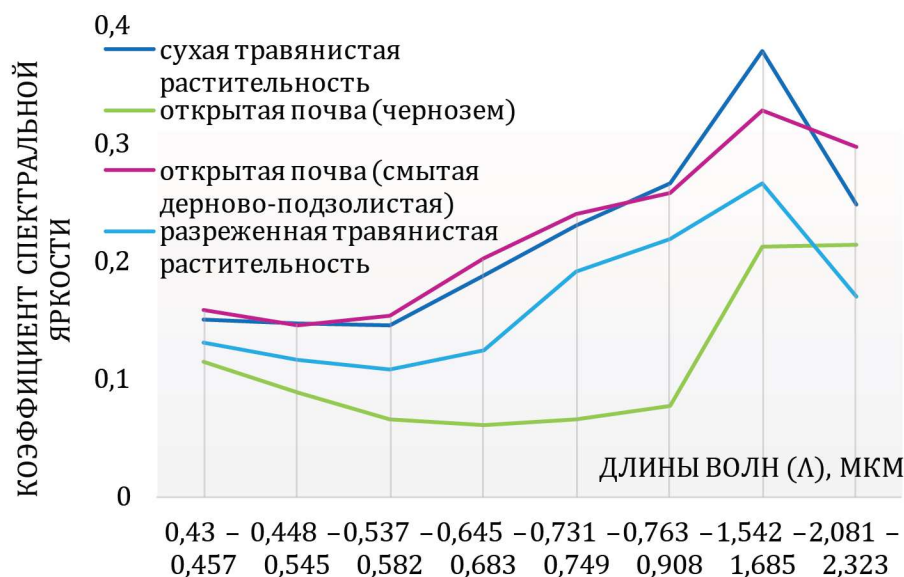


Рис 5.18. Зависимость КСЯ от длины волны излучения

Для выделения по снимкам участков с открытыми почвами оптимально использовать синтез каналов «красные цвета» (NIR-RED-GREEN), а также SWIR-NIR-RED. Синтез естественных цветов малопригоден для отделения открытой почвы и сухой растительности (рис 5.19, а). В синтезе красных цветов открытые почвы отображаются различными оттенками от светло-голубого (характерного для открытой песчаной поверхности или смытой почвы) до почти черного для черноземов (рис. 5.19, б). На наличие растительности указывает красный оттенок на изображении (чем он более выражен, тем больше проективное покрытие растительностью). Участки с сухой растительностью выглядят обычно более светлыми, чем открытая почва.

В свою очередь, в синтезе SWIR-NIR-RED открытые почвы отображаются различными оттенками от светло-розового (характерного для почв с низким содержанием гумуса) до темно-вишневого для черноземов (рис. 5.19, в). Общей особенностью открытых почв в этом синтезе является значительное превышение яркости в средней ИК зоне спектра над яркостью в ближней ИК зоне.

Сложности при распознавании открытой почвы могут возникать для наиболее светлых участков «смытых» почв, спектральный образ которых мало отличим от сухой растительности. Отличить такие участки можно визуально по более сглаженной текстуре изображения, а также за счет голубоватого оттенка, который проявляется в синтезе «красных цветов». Появление этого оттенка обусловлено высокой яркостью открытой почвы в зеленой и красной зонах спектра.

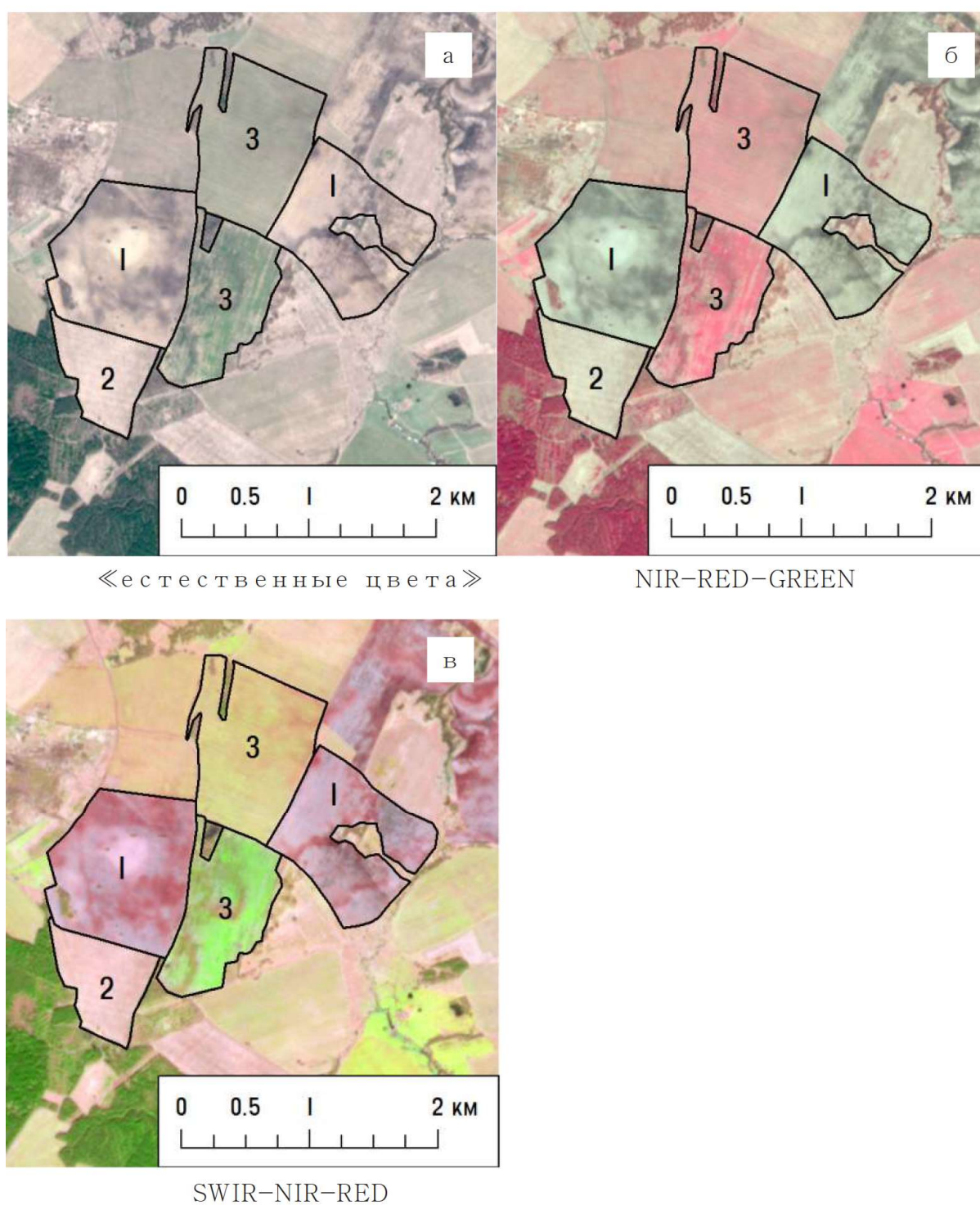


Рис 5.19. Распаханные сельхозземли на черноземах выщелоченных на весеннем снимке Sentinel-2 в трех вариантах цветового синтеза

Спектральная яркость сухих почв определяется содержанием органических (гумусовых) веществ и окислов железа. С увеличением содержания гумуса спектральная яркость почвы снижается. Такая зависимость наиболее выражена при содержании гумуса в почве от 2 до 6%. При содержании гумуса менее 2% спектральные характеристики почвы в большей степени определяются содержанием окислов железа, ила и глины. При прочих рав-

ных условиях, песчаные почвы имеют существенно более высокую яркость, чем глинистые. Также на спектральную яркость может оказывать влияние структура почв - бесструктурные почвы отражают на 10-15% больше света, чем хорошо оструктуренные.

Абсолютные значения коэффициентов спектральной яркости на участке спектра от синего до среднего ПК диапазона возрастают от черноземов к каштановым, серым лесным, подзолистым почвам, далее к почвам пустынь (буроземам, сероземам). Самую высокую яркость в видимом диапазоне имеют солончаки. В синтезе NIR-RED-GREEN в зависимости от содержания гумуса и материнской породы цвет открытых почв меняется от ярко-голубого для песчаных подзолистых почв до темно-серого (почти черного) для черноземов.

В большинстве случаев смена зональных типов почв по снимкам прослеживается плохо, поскольку зональные границы являются нечеткими, с наличием широких переходных зон. Зональные границы почв могут отображаться на снимках с большой обзорностью (протяженность полосы съемки от нескольких сотен км²), полученных в весенний или осенний период, когда значительная часть площади распахана и лишена растительного покрова.

В свою очередь, с высокой детальностью на снимках отражаются локальные вариации почвенного покрова, обусловленные рельефом и изменением условий увлажнения. Наиболее типичны локальные вариации спектральной яркости почв, обусловленные плоскостным смывом. В случае плоскостного смыва органическое вещество смывается с выпуклых участков склонов и аккумулируется в долинах водотоков, понижениях и в вогнутых участках склонов. Соответственно, открытая почва в зоне смыва будет существенно светлее, чем в зоне аккумуляции (рис. 5.20).



Рис. 5.20. Локальные вариации почвенного покрова, обусловленные рельефом. Снимок Sentinel-2 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN. Стрелками показано направление течения воды по склону и смыва почвенных частиц

Вопрос 5.4. Определение температуры поверхности почвы.

Расчет температуры земной поверхности можно выполнить по данным, полученным аппаратурой спутников Landsat 7 или Landsat 8-9, путем использования алгоритма перехода от излучения земной поверхности к радиационной температуре (Temperature Emissivity Separation (TES) algorithm).

Излучательная способность земной поверхности s складывается из излучательной способности растительности s_u , равной 0,99, доля покрытия которой составляет P_u , из излучательной способности открытой почвы s_s , равной 0,97, соответственно занимающей долю, равную $1 - P_u$, и из «внутреннего отражения» от склоновых поверхностей d_s (d_s , пренебрежимо мало для для равнинных территорий и пропорционально возрастающего с увеличением угла падения склоновых поверхностей):

$$s = s_u P_u + s_s (1 - P_u) + d_s.$$

Изображение показателя P_u рассчитывается по формуле: где $NDVI_{\max}$ и $NDVI_{\min}$ - максимальное и минимальное значение вегетационного индекса соответственно.

$$P_u = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2$$

Следующий этап радиометрической коррекции для спутника Ланзаклчается в получении изображения L_x по формуле, реализуемой калькулятором растров:

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{QCAL_{MAX} - QCAL_{MIN}} \right) \times (QCAL - QCAL_{MIN}) + L_{MIN}$$

где: L_x - растровое представление мощности теплового потока, передаваемого электромагнитной волной длиной X , излучаемой с единицы площади в пределах сканируемого телесного угла размерностью $Вт/(м^2 \times \text{стерхмкм})$, $QCAL$ - растр, фиксируемый бортовой съемочной аппаратурой, $QCAL_{MAX} = 255$, $QCAL_{MIN} = 1$.

Переход от скорректированного сигнала к эффективной яркостной температуре производится с использованием следующего уравнения [97]:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right)},$$

где: T_B - изображение, отражающее яркостную температуру по шкале Кельвина, K_1 и K_2 - константы калибровки, приведенные в метаданных ($K_1 = 666,09$ Вт/(м²хстерхмкм), $K_2 = 1282,71$ °К).

На следующем этапе представление яркостной температуры T_B преобразовывается в растр температуры поверхности земли $T_{ЗП}$ следующим образом [110]: где, λ - длина волны излучаемой радиации (11,5мкм), $\rho = kx(e/b) = 1,438 \times 10^{-2}$ мК, h - постоянная Планка ($6,626 \times 10^{-34}$ Джхс), c - скорость света ($2,998 \times 10^8$ м/с). k - постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К).

$$T_{ЗП} = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda \times \frac{T_B}{\rho} \right) \cdot \ln \varepsilon}$$

Получаемые изображения температуры земной поверхности в градусах Кельвина $T_{ЗП}$ °К преобразовывались в изображения температуры земной поверхности в градусах Цельсия $T_{ЗП}$ °С по формуле: $T_{ЗП}$ °С = $T_{ЗП}$ °К - 273,15 [106].

Расчет температуры земной поверхности ($T_{ЗП}$) для данных Landsat 8.9 также рекомендуется выполнять с использованием алгоритма «расщепленного окна прозрачности» (Split Window (SW)). Сначала получают изображения вегетационного индекса NDVI получены в соответствие с формулой .

Растровые представления доли покрытия земной поверхности растительностью P_V следует получать по формуле:

$$P_V = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s)$$

где: для открытой почвы $NDVI_s = 0,2$, для земной поверхности, покрытой растительностью полностью $NDVI_v = 0,8$.

Изображения общей излучательной способности земной поверхности s необходимо строить по формуле:

$$s = s_v \times (1 - P_V) + s_v \times P_V, \quad (2.8.)$$

где: s_v и s_s - излучательная способность растительности и почвы, соответственно, $s_v = 0,987$ для канала 10 и $0,989$ для канала 11, $s_s = 0,971$ для канала 10 и $0,977$ для канала 11.

Для представления спектральной яркости L_λ по исходным растрам $QCAL$ (полученным по 10 или 11 каналам) применяется формула:

$$L_\lambda = M_L \times QCAL + A_L,$$

где: $M_L = 0,000342$ для 10 и 11 каналов, $A_L = 0,1$ для 10 и 11 каналов.

Растры яркостной температуры T_B необходимо рассчитывать согласно формуле [114]:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)},$$

где: $K_1 = 774,89$ для канала 10 и $K_1 = 480,89$ для канала 11, $K_2 = 1321,08$ для канала 10 и $K_2 = 1201,14$ для канала 11.

На основании произведенных преобразований можно получить изображения температуры земной поверхности $TЗП$ в градусах Кельвина [100]:

$$TЗП = TB_{10} + C_1 (TB_{10} - TB_{11}) + C_2 (TB_{10} - TB_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4W) \times (1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6W) \Delta\varepsilon,$$

где: W - содержание водяного пара в атмосфере $0,053 \text{ гхсм}^2$, $s = (s_{10} + s_{11})/2$, s_{10} и s_{11} - растры излучательной способности земной поверхности, полученные по каналам 10 и 11, TB_{10} и TB_{11} - изображения яркостных температур в градусах Кельвина, полученные по каналам 10 и 11, $\Delta s = s_{10} - s_{11}$. Коэффициенты последнего уравнения (2.11.), приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Коэффициенты алгоритма «расщепленного окна прозрачности» (SW), заданной формулой (уравнение 2.11.).

Коэффициент	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
Значение	-0,268	1,378	0,183	54,300	-2,238	-129,200	16,400

Получаемые изображения температуры земной поверхности в градусах Кельвина $TЗП \text{ } ^\circ K$ можно преобразовать в изображения температуры земной поверхности в градусах Цельсия $TЗП \text{ } ^\circ C$ по формуле: $TЗП \text{ } ^\circ C = TЗП \text{ } ^\circ K - 273,15$.

Вопрос 5.5. Мониторинг снежного покрова

Современные космические технологии вносят важный вклад в подготовку тематической площадной информации для сельского хозяйства. Для территории любой страны, с наличием огромных площадей земель сельскохозяйственного назначения, проведение дистанционного мониторинга на полях и пастбищах

имеет особую актуальность, как в вегетационный период, так и в холодное время года. Сельскохозяйственный мониторинг в зимний период, включает наблюдения за границами и сроками залегания и схода снежного покрова на полях. Оперативное картографирование снежного покрова и скорость отступления его границ в весенний период традиционно используются для решения практических агрометеорологических задач, прежде всего, для дистанционной оценки запасов продуктивной влаги в почве к началу посевных работ и картирования результатов (масштаб 1:750 000- для области и 1: 200 000- по районам и хозяйствам).

Как известно, снежный покров играет важную роль в функционировании экосистем и является одним из климатообразующих факторов. Источником снежного покрова служат твердые осадки, которые при отрицательных температурах воздуха могут сохраняться на поверхности почвы продолжительный период. Снег способствует уменьшению промерзания почвы зимой, изменяет термический и водный режим среды обитания растений, предохраняет озимые посевы от вымерзания. От продолжительности залегания снежного покрова, запаса воды и сроков схода снега зависит весеннее увлажнение почв и, следовательно, продуктивность посевов. Формирование снега по территории Беларуси обуславливается географической зональностью, рельефом поверхности и общей циркуляцией атмосферы.

Использование данных спутников AVHRR/NOAA и MODIS/TERRA позволяют быстро и с высокой точностью определить ряд параметров снежного покрова в зимний период, в частности пространственное распределение снежного покрова на полях, сроки его установления и схода по годам. данные со спутника NOAA/AVHRR, в 5 спектральных каналах (0,58-0,68; 0,73-1,10; 3,55-3,93; 10,30-11,30; 11,50-12,50) позволяют строить композитные изображения для распознавания снежного покрова. Анализ спутниковых данных показывает, в какой декаде какого месяца на полях образовался снежный покров.

В условиях Беларуси средняя продолжительность залегания снежного покрова в среднем составляет пять месяцев – с ноября по март. Освобождение полей от снега обычно начинается с более южных районов и продвигается к северным. По климатическим данным сроки схода снега приходятся на конец марта – первую декаду апреля. Однако в различные зимы период залегания снежного покрова может значительно увеличиваться или уменьшаться. Результаты спутникового мониторинга за сроками схода снега в марте позволяют оценить влагозапасы перед весенним севом.

Дешифрирование снежно-ледовых поверхностей имеет множество как научных, так и практических сфер применения – от мониторинга процесса снеготаяния для прогноза уровней и расходов воды весеннего половодья до каталогизации горных ледников и оценки их отклика на современное изменение климата.

Важнейшим дешифровочным признаком всех видов снежно-ледовых поверхностей является высокая отражательная способность в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра, и ее резкое снижение в среднем ИК диапазоне. Именно

это позволяет успешно отличать снег и лед от облачности и других ярких объектов (например, асфальта, бетона или песка). Для визуального распознавания снежно-ледовых поверхностей обычно используют синтез каналов SWIR-NIR-RED, в котором лед и снег имеют голубой цвет, а облачность – белый (рис. 3.3.1). В RGB-комбинациях каналов «естественные цвета» и NIR-RED-GREEN снежный покров имеет ярко-белый цвет, а цвет ледового покрова зависит от его прозрачности.

На вышеописанных спектральных характеристиках основаны индексы, используемые для автоматизированного выделения площади, покрытой снегом по спутниковым снимкам. Наиболее распространенным является нормализованный относительный индекс снега NDSI (normalized difference snow index), однако он не всегда позволяет выделить снежный покров под пологом леса. Для устранения этой проблемы сравнительно недавно был предложен другой индекс, получивший название NDFSИ (normalized difference forest snow index) [35]. Расчет индексов производится по следующим формулам:

$$\text{NDSI} = (\text{green} - \text{swir}) / (\text{green} + \text{swir})$$

$$\text{NDFSИ} = (\text{nir} - \text{swir}) / (\text{nir} + \text{swir})$$

где GREEN – яркость в зеленом канале, NIR – яркость в ближнем инфракрасном канале, SWIR – яркость в среднем инфракрасном канале.

Основными задачами дешифрирования снежного покрова является определение площади, покрытой снегом (например, расчет площади снегового покрытия в пределах речного бассейна в период снеготаяния), а также выявление участков загрязнения снежного покрова.

Пространственное распределение снежного покрова в период таяния зависит от рельефа, растительного покрова и других свойств подстилающей поверхности. Причем даже незначительные перепады высот (в пределах 50-100 м) существенно влияют на распределение снежного покрова. Неоднородность распределения снежного покрова в зависимости от рельефа в период таяния характеризует рис. 5.21.

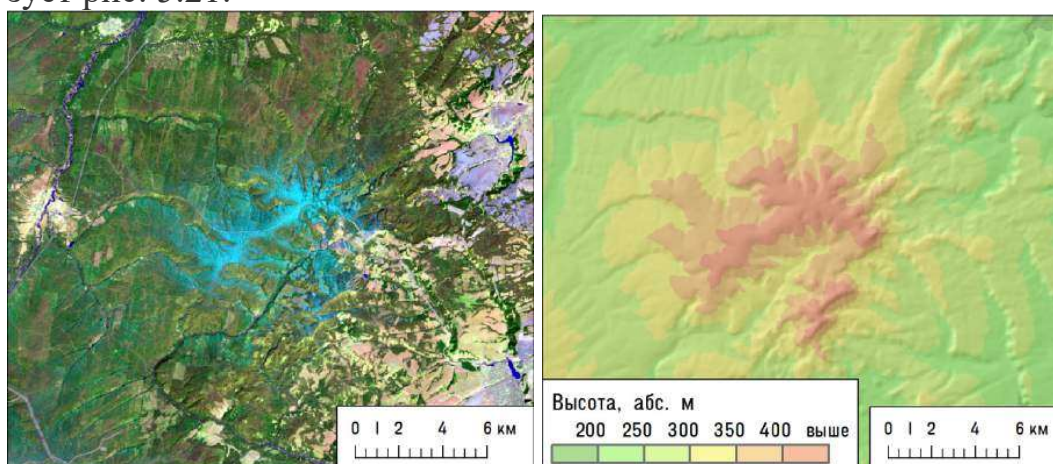


Рис. 5.21. Характерное распределение снежного покрова на возвышенности в конце периода снеготаяния на весеннем снимке Landsat-8, в цветовом синтезе «SWIR-NIR-RED (а) и цифровая модель рельефа этой же территории

Большая часть территории (с абсолютными высотами 200-300 м) на момент съемки уже освободилась от снега, в то время как на возвышенности (с абс. высотой до 446 м) сохранялся сплошной снежный покров.

Оценка загрязнения снежного покрова по снимкам возможна обычно во второй половине зимы и только после длительных периодов без осадков. Успешно выявляются по снимкам участки загрязнения снежного покрова сажей и другими взвешенными веществами (оседающими на снежную поверхность), что характерно для районов вблизи крупных предприятий черной металлургии и электростанций, работающих на угле.

Чистый снежный покров в комбинации каналов «естественные цвета» будет иметь ярко-белый цвет, а в синтезе SWIR-NIR-RED - ярко-голубой, в то время как загрязненный снег будет значительно темнее).

Для дешифрирования ледового покрова на водоемах, так же, как и для снежного покрова, чаще всего используют синтез каналов SWIR-NIR-RED. В большинстве случаев лед на водоемах, как и снег, характеризуется значительным снижением спектральной яркости в среднем ИК диапазоне спектра в сравнении с видимым и ближним ИК, что и является его основным дешифровочным признаком.

Но в отличие от снега, яркость ледового покрова в видимом и в ближнем ИК каналах значительно ниже. Поэтому в синтезе SWIR-NIR-RED лед значительно темнее снега. Этот же признак позволяет отличать лед от поверхности, покрытой снегом (рис. 5.21). Также в этом синтезе каналов успешно дешифрируются трещины и любые участки открытой воды, поскольку вода имеет очень низкую отражательную способность в ИК диапазонах спектра. По этой же причине лед, покрытый слоем воды, будет иметь значительно более темный цвет, чем сухой лед.

В синтезе естественных цветов ледовый покров, в зависимости от своей структуры, будет иметь оттенки от белого (лед, покрытый снегом) до серого. В этом синтезе также успешно дешифрируется структура ледового покрова (трещины) и участки поверхности льда, покрытые водой.

Вопрос 5.6. Использование данных дистанционного зондирования в экологическом мониторинге.

Промышленные и техногенные объекты имеют весьма разнообразные дешифровочные признаки, но все же у них можно выделить ряд общих особенностей. В большинстве случаев дешифрирование производится по признакам нарушения земель, которое характерно для участков разработки полезных ископаемых и мест хранения отходов. Нарушенные земли почти всегда характеризуются отсутствием почвенно-растительного покрова. За счет этого они имеют высокую яркость в видимом диапазоне спектра. В ближнем ИК диапазоне яркость снижается, значения вегетационного индекса NDVI близки к нулю или даже отрицательные.

Спектральные свойства поверхности на участках нарушения земель будут определяться подстилающей породой. Например, участки добычи гипса или известняка будут иметь более высокую яркость в видимой зоне спектра, чем карьер по добыче глины.

Такую же особенность можно отметить при сопоставлении отвалов пустой породы, образованных, например, при добыче солей или каменного угля.

Крупные промышленные предприятия хорошо дешифрируются даже на снимках среднего пространственного разрешения по характерным контурам производственных зданий, сооружений и транспортных коммуникаций (например, внутренних железнодорожно-рожных путей). Дешифровочные признаки, сходные с промышленными объектами, имеют также транспортно-логистические узлы (которые часто занимают бывшие промышленные сооружения).

Все подобные объекты отличаются высокой яркостью в видимых каналах спектра (за счет значительной площади, покрытой искусственными материалами), а также в среднем ИК диапазоне. В свою очередь, яркость в ближней ИК зоне спектра сравнительно низкая.

В целом для промышленных объектов характерно минимальное озеленение (в сравнении с другими видами застройки), но прилегающие территории (санитарно защитные зоны) часто являются хорошо озелененными.

На основе геометрических признаков в некоторых случаях можно определить тип производства даже по снимкам среднего пространственного разрешения. Так, крупные нефтехимические и нефтеперерабатывающие комплексы дешифрируются по наличию сети трубопроводов, также характерным отличительным признаком являются ректификационные колонны. Характерным признаком машиностроительных комплексов и предприятий военно-промышленного комплекса являются крупные производственные корпуса, наличие внутренних железнодорожных путей. Крупные металлургические предприятия могут быть обнаружены по наличию отвалов пустой породы. Большую площадь занимают производственные корпуса и подъездные железнодорожные пути (что характерно и для машиностроительных предприятий). Однако наиболее интересным признаком является наличие тепловых аномалий, связанных с горячими цехами, которые имеют высокую яркость в средней ИК зоне спектра и в синтезе SWIR-NIR-RED выделяются оранжевым цветом. Такие же тепловые аномалии характерны, например, для факелов сжигания попутного газа на нефтедобывающих производствах.

Добыча полезных ископаемых. Наибольшие площади изъятия и нарушения земель связаны с открытой (карьерной) добычей строительных материалов (песка, песчано-гравийной смеси, глины, известняка, гипса), руд черных и цветных металлов, каменного и бурого угля, а также с разработкой месторождений нефти и газа.

Любые карьеры (разрезы) дешифрируются на снимках среднего разрешения как участки нарушенных земель, имеющие высокую яркость в каналах видимой части спектра (обычно более высокую, чем у участков с открытым, но не нарушенным почвенным покровом). Особенно это характерно для гипсовых и известняковых карьеров (рис. 5.22). В синтезе SWIR-

NIR-RED карьеры, как и прочие участки нарушенных земель, отображаются различными оттенками (в зависимости от разрабатываемой породы), близкими к ярко-розовому цвету. Важным дешифровочным признаком является наличие подъездных путей, а также других производственных сооружений.

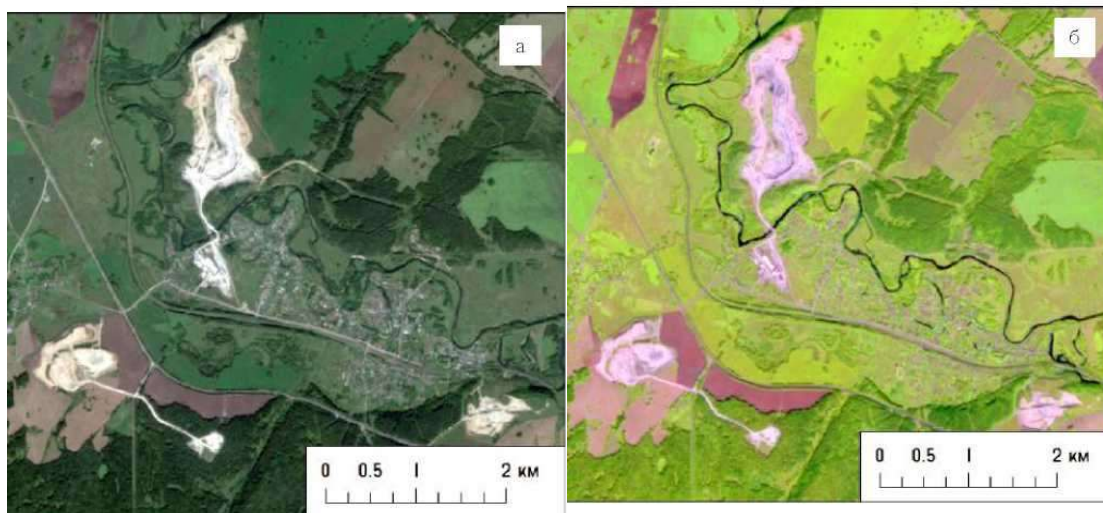


Рис. 5.22 Карьеры по добыче гипса у пос. Ергач (Пермский край). Снимок Sentinel—2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Открытая порода в карьерах по добыче известняка или гипса имеет ярко-белый цвет (рис. 5.22), в карьерах по добыче глины, песка или гравия - светло-бежевый. На дне карьеров по добыче песка, глины или гравия часто есть участки, заполненные водой (рис. 5.23).



Рис. 5.23. Карьеры по добыче песка или песчано — гравийной смеси. Снимок Sentinel—2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Наибольшей площадью и глубиной отличаются карьеры по добыче металлургического сырья и угля. Их важнейший дешифровочный признак - наличие подъездных путей для вывоза руды, в том числе и в самих карьерах (как правило, дорога для большегрузного транспорта, спускающаяся

серпантином на дно). Из-за этого изображение имеет характерную кольцеобразную структуру (рис. 5.24). Спектральные характеристики частично определяются особенностями вскрытой породы, но в любом случае в синтезе каналов SWIR-NIR-RED такие карьеры будут иметь ярко-розовый или малиновый цвет. Вблизи таких карьеров, как правило, находятся крупные отвалы пустой породы, что отличает их от карьеров по добыче строительных материалов.

Некоторые виды полезных ископаемых (например, россыпное золото или алмазы) добываются открытым (дражным) способом в руслах и поймах рек, что приводит к значительному нарушению пойменных экосистем. В результате старое русло полностью уничтожается, в русле и пойме формируется нарушенный ландшафт с множеством мелких озер и практически лишенный растительности. В синтезе каналов SWIR-NIR-RED такие участки отличаются ярко-розовым цветом с характерной текстурой, образованной сложным рельефом и множеством небольших водоемов. На старых участках таких разработок растительность постепенно восстанавливается, а основным дешифровочным признаком остается характерный микрорельеф (рис. 5.25).

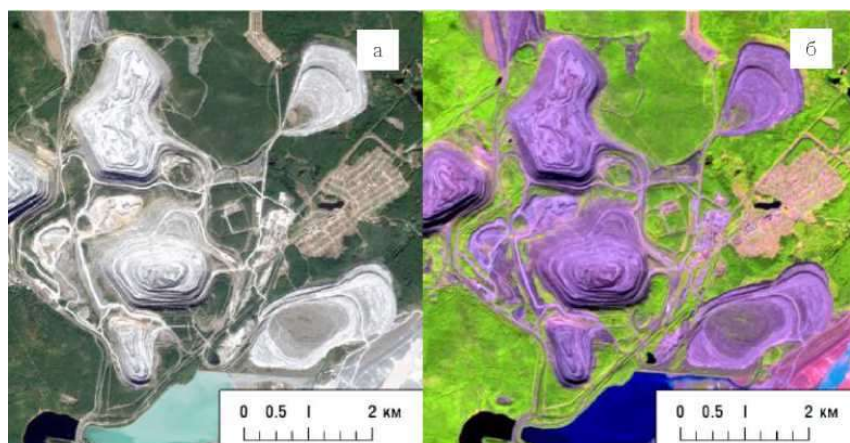


Рис. 5.24. Карьеры по добыче металлургического сырья (железной руды) в г. Качканар. Снимок Sentinel—2 в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

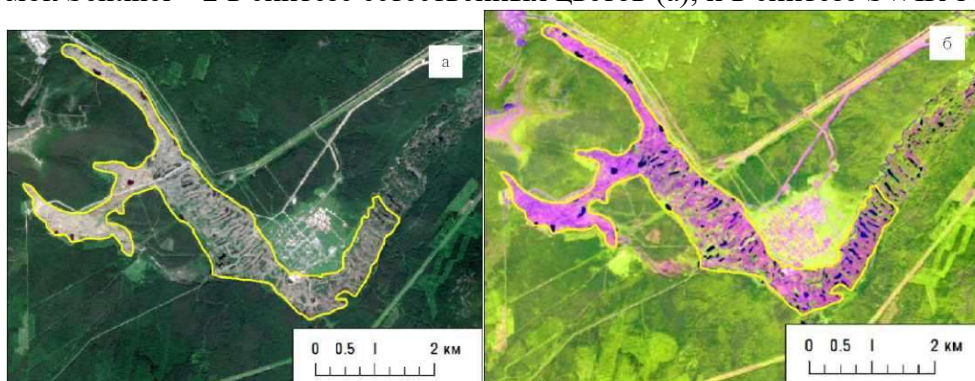


Рис. 5.25. Последствия разработки месторождения алмазов дражным способом (Красновишерский район Пермского края). Снимок Sentinel—2 в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Значительные площади изъятия земель связаны с разработкой горючих ископаемых - нефти и газа. Участки разработки дешифрируются по

«кустам» скважин и площадок, связанных между собой трубопроводами и подъездными путями. Площадки, на которых размещены скважины, как правило, лишены растительности и хорошо выделяются на ее фоне. Помимо самих скважин, в пределах месторождений располагаются также установки первичной переработки нефти (УППН), и факела сжигания попутного газа. Последние хорошо видны в синтезе каналов SWIR-NIR-RED (благодаря высокой яркости в канале SWIR) и выделяются как тепловые аномалии (рис. 5.26).



Рис. 5.26. Разрабатываемое нефтяное месторождение на снимке Sentinel-2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б), прямоугольником выделен факел сжигания попутного газа

В лесной зоне Европейской части России значительные площади занимают торфоразработки (в основном участки, где добыча торфа велась в XX веке, а в настоящее время прекращена). Дешифрирование торфоразработок важно, так как они представляют собой зоны повышенной пожарной опасности, а возникающие на осушенных торфяниках пожары крайне сложно поддаются тушению и могут продолжаться несколько месяцев.

В синтезе естественных цветов торфоразработки иногда сложно отличить от вырубок или карьеров по добыче песка. Характерным признаком является множество сходных по размерам впадин прямоугольной формы (торфяных карьеров), некоторые из них могут быть заполнены водой, другие - осушены, третьи - покрыты растительностью. По соседству обычно распространены заболоченные участки. В синтезе каналов SWIR-NIR-RED осушенные торфяники, не покрытые растительностью, имеют ярко-розовый цвет (иногда с оттенком оранжевого) за счет очень высокой яркости открытого торфа в среднем ИК диапазоне. Этот оранжевый оттенок (рис. 3.11.9, б) позволяет отличить в данном спектральном синтезе торфяники от сплошных вырубок и карьеров, а также от открытой почвы.

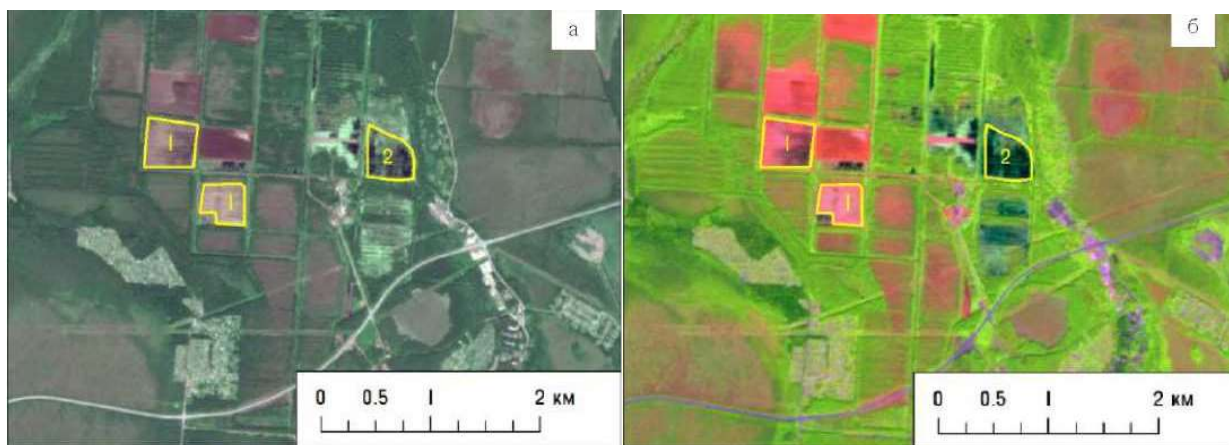


Рис.5.27. Торфоразработки: осушенные (1) и затопленные (2) со Sentinel—2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Объекты размещения промышленных и бытовых отходов

Хранение промышленных отходов, в частности, связанных с разработкой месторождений полезных ископаемых и горно-обогатительными комбинатами (ГОК), приводит к изъятию и нарушению значительных площадей земель, а также вызывает негативное воздействие на природную среду прилегающих территорий. То же относится и к полигонам для хранения твердых бытовых отходов.

Дешифровочные признаки объектов размещения отходов на снимках среднего разрешения определяются агрегатным состоянием отходов (твердые, жидкие) и соответственно, способом хранения (отвал, шламохранилище). В шламохранилищах (которые обычно создаются при горно-обогатительных комбинатах) хранятся жидкие или мелкодисперсные отходы (обводнение производится для разделения на твердую и жидкую фазы). Основным дешифровочным признаком этих объектов на снимках является наличие гидротехнического сооружения (дамбы), а также частичное или полное покрытие отходов водой, осушенные участки при этом имеют высокую яркость в видимом диапазоне спектра.

В зависимости от типа отходов, шламохранилища могут иметь разные дешифровочные признаки. Так, например хранилище отходов содового производства отличается ярко-белым цветом в синтезе естественных цветов из-за высокой отражающей способности этого вида отходов (рис. 5.28).

Отвалы представляют собой места хранения отходов (пустой породы) в твердом виде. В большинстве случаев они располагаются вблизи места добычи сырья (шахты или карьера). Их дешифровочные признаки также зависят от вида отходов. Например, отвалы предприятий по добыче калийно-магниевых солей имеют более высокую яркость в видимом и среднем ИК диапазонах спектра, чем отвалы большинства металлургических предприятий (рис. 5.29). В любом случае, к отвалам ведут подъездные пути (за исключением тех случаев, когда отвал давно не используется или находится в стадии рекультивации). Часто отвалы становятся источником значительного загрязнения природной среды (в первую очередь водных объ-

ектов) на прилегающей территории. Признаки катастрофического загрязнения могут быть выявлены по факту обнаружения погибшей растительности в поймах рек (рис. 3.11.13). Таким же образом по спутниковым снимкам можно выявить и источник загрязнения.

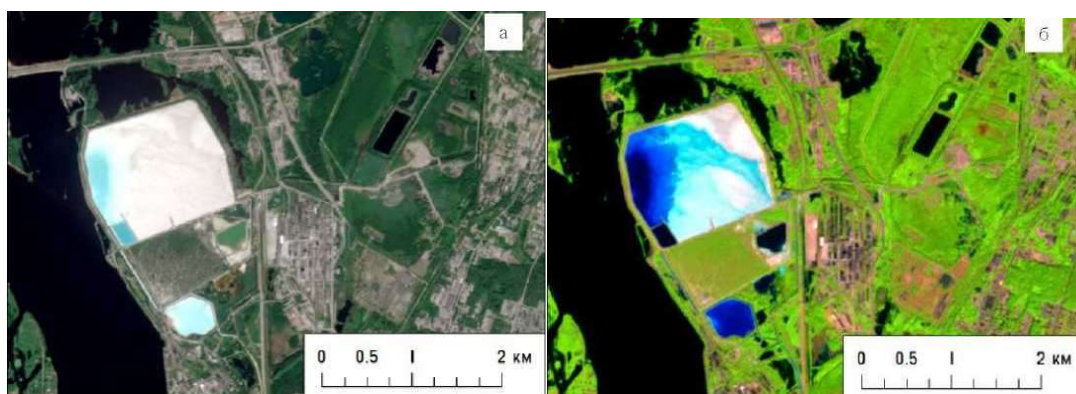


Рис. 5.28. Хранение отходов содового производства на снимке Sentinel—2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Полигоны хранения твердых бытовых отходов также являются значимым источником загрязнения окружающей среды вблизи крупных городов. Они дешифрируются как участки с высокой яркостью в видимом диапазоне спектра, с наличием подъездных путей. Как правило, они расположены вблизи крупных городских агломераций. Многие полигоны также имеют систему отведения воды, по периферии видны углубления, частично заполненные водой.

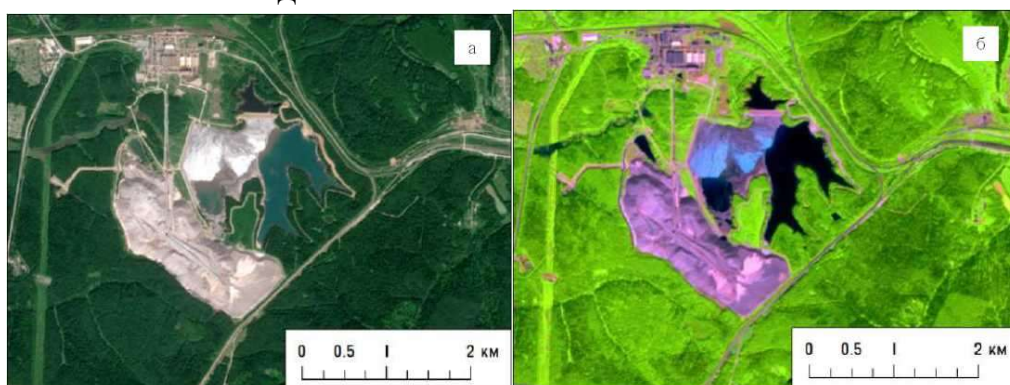


Рис. 5.29. Отвалы, образованные при добыче калийно— магниевых солей вблизи г.Березники Пермского края. Снимок Sentinel—2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Вопрос 5.7. Мониторинг лесных насаждений.

Дешифрирование и картографирование породного состава и возрастной структуры лесов традиционно является одним из важнейших направлений использования данных космической съемки. На основе снимков низ-

кого (Terra/Aqua MODIS, SPOT-Vegetation) и среднего (Landsat) пространственного разрешения создан ряд картографических продуктов, характеризующих лесной покров России в целом или ее отдельных регионов. Основные лесообразующие породы таежной зоны (темнохвойные, светлохвойные и мелколиственные) достаточно хорошо различимы по спектральным признакам на снимках среднего и высокого пространственного разрешения, при наличии каналов ближнего и среднего ИК диапазонов спектра. Успешность дешифрирования также в значительной степени зависит от сезона съемки. При правильном подборе снимков разных сезонов можно получать достаточно надежные оценки породного состава лесов.

Для дешифрирования породного состава лесов по снимкам летнего периода наиболее информативен ближний ИК канал, в котором кроны лиственных деревьев имеют значительно более высокий коэффициент отражения, чем хвойных. Большое значение имеет также диапазон Red Edge (переходный между красным и ближним ИК). В видимом диапазоне спектра различия в спектральной яркости разных пород деревьев в летний период сравнительно невелики, этот диапазон достаточно информативен только в осенний период.

В синтезе каналов SWIR-NIR-RED темнохвойные леса имеют темно-зеленый цвет, лиственные леса - ярко-зеленый (салатовый), а смешанные леса отличаются различными переходными оттенками, а зависимости от доли хвойных деревьев в насаждении, а также от его возраста. Смешанный лес со значительным участием широколиственных пород (липы) в этом синтезе может иметь слегка желтоватый оттенок, который и будет его отличительным признаком.

В синтезе каналов NIR-RED-GREEN (красные цвета) на летнем снимке темнохвойные леса будут иметь темно-красный оттенок, мелколиственные леса - ярко-красный, а смешанные леса - переходные цвета. Отличить елово-липовый лес от елово-березового леса в данном синтезе затруднительно.

Отличительным признаком сосновых лесов часто является более высокая яркость в средней ИК зоне спектра, а также в видимых каналах. Сосновые леса часто произрастают на песчаных почвах, где напочвенный покров сильно обеднен. На спектральный образ оказывают влияние участки, лишенные растительности, и это приводит к росту яркости в среднем ИК и в меньшей степени в красном диапазоне спектра. В результате, в синтезе SWIR-NIR-RED сосновые леса часто имеют специфический красноватый оттенок, позволяющий отличать их от темнохвойных лесов.

Важно отметить, что в лесах с высокой полнотой спектральный образ формируется в основном за счет кроны деревьев первого яруса, при этом подрост не оказывает существенного влияния. Для того, чтобы делать выводы о породном составе подроста (например, о наличии ели и пихты под пологом мелколиственных пород) необходимо использовать разносезонные снимки.

Для получения более детальной характеристики породного состава лесов необходимо использовать разносезонные снимки, причем наиболее информативными являются снимки осеннего сезона (полученные в период

окончания вегетации, пожелтения листвы и листопада). Весьма полезны также снимки зимнего и весеннего сезона. По ним, в частности, можно выявить восстановление деревьев хвойных пород под пологом мелколиственных (березы, осины).

Недостатком осенних и зимних снимков является низкий угол освещения Солнцем, в результате чего один и тот же тип растительности будет иметь существенно различающиеся спектральные характеристики в зависимости от положения на склоне (северной или южной экспозиции).

При использовании осенних снимков появляется ряд дополнительных дешифровочных признаков для распознавания лесообразующих пород. Это единственный период года, когда для распознавания породного состава лесов достаточно информативен RGB-синтез естественных цветов. Леса с преобладанием березы на

таком изображении будут иметь различные оттенки желтого цвета, а участки осинников часто приобретают оранжевый оттенок (т.к. листья осины в осенний период краснеют). Леса с преобладанием хвойных пород выглядят темно-зелеными.

В синтезе каналов NIR-RED-GREEN лиственные леса на осенних снимках приобретают светло-серый оттенок.

В связи с уменьшением содержания хлорофилла в листьях снижается коэффициент отражения в ближнем ИК канале, в то время как хвойные породы деревьев сохраняют красный оттенок. Для смешанных лесов появляется возможность оценить процент хвойных и лиственных пород. Также возможно разделить лиственные породы по дате сброса листвы: например, липа сбрасывает листья на несколько дней раньше мелколиственных пород, что позволяет надежно разделить широколиственные и мелколиственные леса.

Снимки, полученные в весенний период (после схода снежного покрова и до начала вегетационного периода) наиболее полезны для оценки доли хвойных пород в насаждении (в том числе наличия или отсутствия их в подросте). Также по снимкам весеннего сезона успешно определяется породный состав лесов, которые восстанавливаются на заброшенных сельскохозяйственных угодьях и на вырубках. Хвойные деревья на снимках этого периода в синтезе NIR-RED-GREEN имеют ярко-красный оттенок (причем яркость зависит от сомкнутости крон), а лиственные породы - серый или песочный оттенок. Все лиственные породы деревьев на весенних снимках выглядят примерно одинаково, т.к. их характерные дешифровочные признаки проявляются только после начала сезона вегетации.

Наиболее эффективным для визуального (а иногда и для автоматизированного) дешифрирования является совместное использование нескольких снимков, полученных в разные сезоны года.

Определить возраст насаждения по космическому снимку значительно сложнее, чем породный состав. При этом большую роль играет текстура изображения. Первичные старовозрастные темнохвойные леса (с преобладанием ели, пихты и кедра) на снимках с пространственным разрешением 10-30 м обычно можно отличить по характерной мелкопятнистой

текстуре. В таких лесах часто наблюдается высокий процент сухостойных деревьев, а также образуется много мелких прогалин на месте локальных ветровалов (или естественного отпада деревьев). Они создают характерный рисунок изображения с сочетанием множества более темных участков (соответствующих кронам хвойных деревьев) и более светлых (соответствующих прогалинам). Первичные леса распространены в основном в пределах особо охраняемых природных территорий или в труднодоступных горных районах, а также по крутым склонам речных долин и в водоохраных зонах.

Первичные смешанные (елово-березовые) леса имеют те же дешифровочные признаки - характерную мелкопятнистую текстуру, связанную с большим количеством прогалин на месте упавших деревьев. Они произрастают также на труднодоступных участках и в горах недалеко от верхней границы леса, т.е. выше, чем первичные темнохвойные леса. Первичные сосновые леса произрастают в основном на труднодоступных заболоченных участках и имеют характерную для болот текстуру сглаженную. Такие леса обычно низкорослые (несмотря на большой возраст деревьев) т.к. произрастают в неблагоприятных условиях. Спектральные признаки преобладающих древесных пород для первичных и вторичных лесов в целом одинаковы.

Вторичные леса на разных стадиях сукцессии, восстанавливающиеся после вырубок, отличаются также в основном по текстурным признакам. Следы лесозаготовительной деятельности: сеть просек, дорог для вывоза леса, а также геометрически правильные контуры рубок разных лет хорошо видны на снимках даже спустя несколько десятилетий после лесозаготовок. Также для районов с преобладанием вторичных лесов характерна ситуация, когда на водораздельных участках распространены смешанные и мелколиственные вторичные леса, а в водоохраных зонах сохраняются темнохвойные леса. Вторичные леса отличаются большей плотностью древостоя, в них меньше сухостоя и прогалин, чем в первичных лесах, что влияет на текстуру изображения.

На труднодоступных территориях, где лесозаготовка ведется в ограниченных объемах, также встречаются крупные массивы вторичных лесов, восстанавливающихся после пожаров или после ветровалов. В случае отсутствия вырубок, контур пройденной пожаром (ветровалом) территории можно установить даже через 60-70 лет после события, т.к. полное восстановление темнохвойного леса занимает более 100 лет.

Лесохозяйственная деятельность является одним из важнейших объектов космического мониторинга. Задачами космического мониторинга рубок леса могут быть оценка изменения лесистости территории и породно-возрастной структуры лесов на фоне хозяйственного освоения, выявление сохранившихся участков спелых и перестойных насаждений, представляющих ценность как ресурс древесины, оценка лесовосстановления на вырубках, выявление незаконных рубок леса и нарушений при лесозаготовке

и др.

Обнаружение рубок леса по космическим снимкам среднего и высокого разрешения не представляет большой сложности за исключением тех случаев, когда рубки занимают небольшую площадь или являются выборочными. Все нарушения лесного покрова (связанные как с лесозаготовками, так и с природными факторами) в целом имеют сходные спектральные дешифровочные признаки. При частичном или полном нарушении (изъятии) лесного покрова происходит снижение коэффициента отражения в ближней ИК зоне спектра (NIR), обусловленное уменьшением содержания хлорофилла. В то же время растет коэффициент отражения в средней ИК зоне (SWIR), что обусловлено появлением участков открытой почвы. Также на вырубках происходит рост коэффициента отражения в видимой зоне спектра (наиболее выраженный в красном канале), за счет того, что открытая почва отражает больше солнечной радиации, чем кроны деревьев.

Для дешифрирования вырубок по снимкам, полученным в вегетационный период, наиболее информативным является средний ИК диапазон (SWIR) и различные варианты цветового синтеза с его участием, например синтез SWIR-NIR-RED. Но поскольку многие спутники (SPOT-6, Ресурс-П, PlanetScore и др.) не ведут съемку в этой спектральной зоне, или же данные имеют пониженное пространственное разрешение (Sentinel-2), то для дешифрирования часто используют также синтез NIR-RED-GREEN. Синтез естественных цветов используется реже, так как менее информативен и больше подвержен влиянию атмосферных эффектов (дымки и полупрозрачной облачности).

В свою очередь, для выявления вырубок по снимкам в период со снежным покровом наиболее информативны каналы видимого диапазона, из-за большого яркостного контраста между лесной растительностью и открытыми участками, покрытыми снегом.

В целом дешифрирование рубок по зимним снимкам, особенно при достаточно высоком угле стояния Солнца (в начале весны) считается более эффективным, чем по снимкам вегетационного периода

Вопрос 5.8. Мониторинг пожаров в природных экосистемах.

Отличительной особенностью спектрального образа лесных гарей могут быть более низкие, чем у вырубок, коэффициенты отражения в видимой и в ближней ИК зонах спектра. Это обусловлено наличием продуктов горения (золы) на поверхности почвы. Таким образом, в синтезе NIR-RED-GREEN гари будут иметь голубовато-зеленый оттенок, как и другие нарушения лесного покрова, но они будут значительно темнее вырубок (рис. 5.30, а). В синтезе SWIR-NIR-RED гари будут иметь темно-розовый оттенок - более темный, чем у вырубок (рис. 5.30, б). Но все же основным дешифровочным признаком, позволяющим отделить гари от вырубок, является геометрическая форма. Гари обычно имеют сложную форму, вытянуты по направлению ветра. Однако соотношение длины и ширины редко

превышает 3/1. Гари не имеют прямых углов, за исключением тех случаев, когда пожар прошел через районы активных лесозаготовок. Отсутствие прямых углов является наиболее надежным отличительным признаком гарей от вырубок.

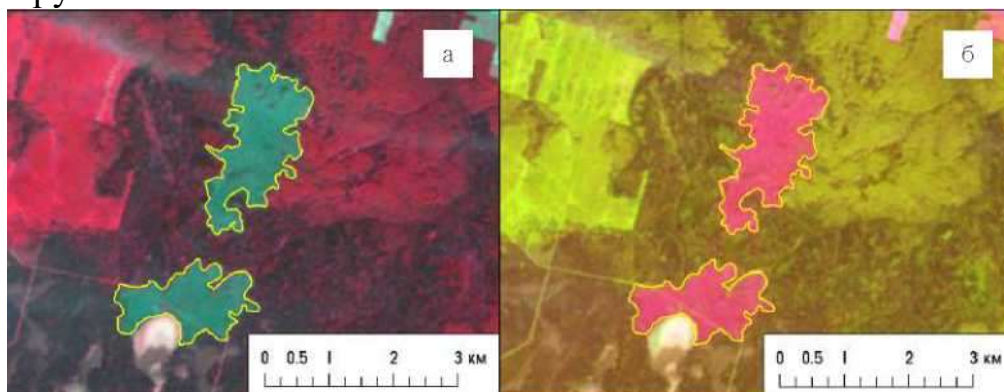


Рис. 5.30. Гари от пожаров на снимке Landsat—8, полученном в летний период, в синтезе NIR-RED-GREEN (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Существует возможность разделить *гары, вызванные верховыми и низовыми пожарами*. Верховой пожар, как известно, перемещается по кронам деревьев и обычно вызывает полную гибель насаждения. Гарь от верхового пожара обычно вытянута по направлению ветра. На рис. 5.31,а приведен фрагмент снимка гарей от верхового пожара, распространявшегося с запада на восток. Низовой пожар может вызвать гибель лишь незначительной части деревьев. В этом случае определить по снимку площадь, пройденную пожаром, невозможно. Часто на месте низового пожара образуется сложная мозаика поврежденных и сохранившихся участков леса (рис. 5.31,б).

В некоторых случаях по снимкам Landsat и Sentinel-2 можно обнаружить и *действующие пожары*. Для этого может быть полезен как видимый диапазон, так и ИК каналы. В синтезе «Естественные цвета» хорошо видны дымовые шлейфы от пожаров (рис. 5.32, а). В синтезе каналов SWIR-NIR-RED или SWIR2-NIR-RED при пространственном разрешении снимка 20-30 м хорошо выделяются фронты пожаров (рис. 5.32, б). Черные полосы на рис. 3.7.3 связаны с тем, что здесь используется снимок со спутника Landsat-7 ETM+ после сбоя Scan Line Corrector (SLC-off), который произошел в 2003.

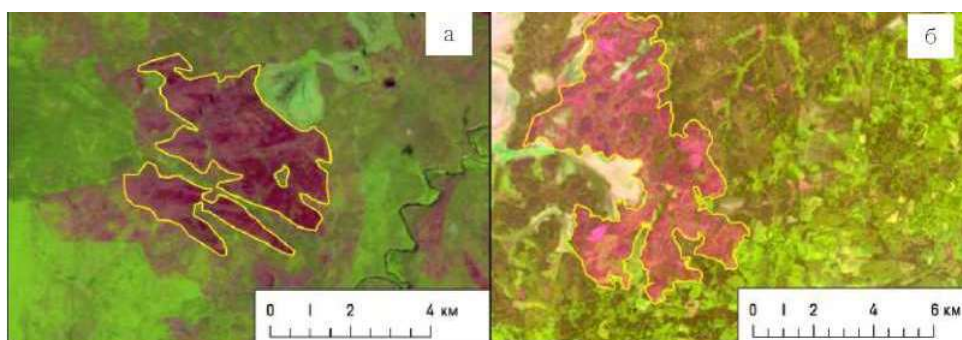


Рис. 5.31. Гари от верхового (а) и низового (б) пожаров г. на снимке Landsat—8 в синтезе SWIR-NIR-RED

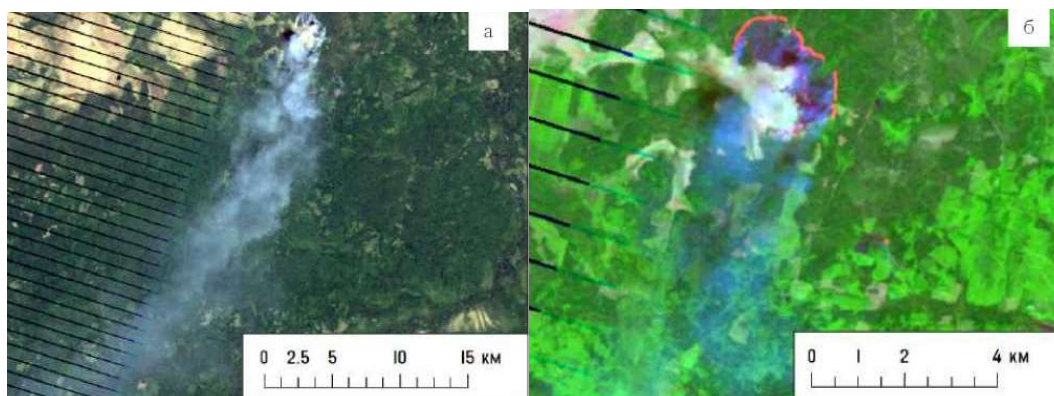


Рис. 5.32. Обнаружение действующего низового пожара по дымовому шлейфу на снимке Landsat—7 ETM+ в синтезе естественных цветов (а) и фронт этого пожара в синтезе SWIR2-NIR-RED (б)

Лесовосстановление на гарях в целом имеет те же дешифровочные признаки, что и на вырубках. На пионерной стадии лесовосстановления основным признаком является рост коэффициента отражения в ближней НК зоне за счет роста растительной биомассы, и некоторое его снижение в средней НК зоне спектра, за счет уменьшения площади открытого грунта. На последующих стадиях лесовосстановления часто формируются мелколиственные (осиново-березовые) леса, благодаря чему старые гари длительное время выделяются на фоне окружающих их спелых и перестойных насаждений.

Вопрос 5.8. Мониторинг загрязнения водных объектов.

Основные спектральные свойства водной поверхности Водные объекты сравнительно легко дешифрируются по снимкам оптического диапазона, поскольку водная поверхность имеет уникальные спектральные свойства, позволяющие легко отличить ее от других видов поверхностей. Для водной поверхности характерно значительное снижение спектральной отражательной способности от видимого к ближнему ИК диапазону спектра, и еще большее снижение в среднем ИК диапазоне. В ближнем ИК и в среднем ИК диапазонах спектра вода поглощает свыше 90% солнечного излучения. Поэтому на снимках в соответствующих каналах водные объекты являются наиболее темными (наряду с затененными участками суши). Также водная поверхность является одним из немногих объектов, имеющих устойчиво отрицательные значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI.

По спутниковым снимкам в видимом и ИК диапазонах спектра успешно дешифрируются только те виды загрязнения, которые приводят к изменению оптических или тепловых свойств поверхности. Чаще всего спутниковые данные применяются для обнаружения загрязнения водных объектов и почвы. По снимкам в каналах видимой части спектра могут

быть успешно выделены как минимум три вида загрязнения водных объектов: загрязнение взвешенными веществами (повышенная мутность воды), загрязнение соединениями железа (резко изменяющее оптические свойства воды), а также загрязнение биогенными элементами, которое сопровождается размножением синезеленых водорослей (цветение воды). Кроме того, по снимкам в тепловом диапазоне успешно выделяются крупные источники сброса в водоемы подогретых вод с электростанций (теплового загрязнения).

Повышенная мутность воды чаще всего связана с естественными причинами (наблюдается в период весеннего половодья и дождевых паводков), она также косвенно характеризует интенсивность эрозии почв в речном бассейне. Высокое содержание в воде взвешенных веществ в период межени может быть вызвано деятельностью человека, например, разработкой полезных ископаемых в русле реки выше по течению. Повышенная мутность воды хорошо выделяется по снимкам в естественных цветах, в этом синтезе мутная вода будет иметь характерный бежевый цвет, насыщенность которого зависит от концентрации взвешенных веществ (рис. 5.33). В синтезе NIR-RED-GREEN мутная вода будет иметь светло-голубой оттенок, а в синтезе SWIR-NIR-RED - ярко-синий (в отличие от темно-синей, почти черной чистой воды).



Рис. 5.33. Поступление воды с повышенной мутностью в Камское водохранилище в период весеннего половодья. Снимок Landsat—8 в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Размножение синезеленых водорослей (цветение воды) как правило, наблюдается во второй половине летнего сезона и в начале осени, что связано с прогревом воды. Опасность интенсивного цветения воды связана с резким снижением концентрации кислорода в воде и возможной гибелью рыбы. Цветение воды резко усиливается также при наличии дополнительного источника поступления биогенных элементов со сточными водами или их смыва с сельхозземель. Цветение воды наиболее успешно выявляется по снимкам в синтезе естественных цветов. Однако при высокой концентрации синезеленых водорослей оно становится хорошо различимым также и в комбинациях каналов с использованием ИК спектра. В синтезе NIR-RED-GREEN участки с интенсивным цветением воды будут иметь

ярко-розовый оттенок (за счет повышения содержания хлорофилла на водной поверхности), а в синтезе SWIR-NIR-RED они приобретают зеленый оттенок.

Загрязнение воды соединениями железа характерно для кислых вод (в которых железо может находиться в подвижной форме). При снижении кислотности железо выпадает в осадок в виде гидроксида. Повышенной кислотностью и концентрацией железа отличаются воды рек, вытекающих из обширных болот. Такая вода может иметь характерный бурый оттенок. Экстремально высокие (опасные) концентрации железа в воде связаны с деятельностью человека по добыче полезных ископаемых. Это могут быть воды, стекающие с породных отвалов, а также откачиваемые из шахт, т.к. они взаимодействуют с различными минералами, содержащими серу, и окисляют их. В Пермском крае экстремально высокие концентрации железа имеют кислые воды, изливающиеся из шахт Кизеловского угольного бассейна, они загрязняют реки на десятки километров вниз по течению.

Высокая концентрация железа сильно меняет оптические свойства воды - она становится ярко-рыжей или бурой, что позволяет хорошо различать загрязнение и находить его источники на космических снимках в видимом диапазоне спектра (рис.5.34). Основным признаком загрязнения воды соединениями железа является именно повышение яркости в красном диапазоне спектра, в сравнении с синим и зеленым. В синтезе NIR-RED-GREEN загрязненная вод будет иметь голубовато-зеленый оттенок и плохо отличается от мутной воды.



Р и с . 5.34. Загрязнение реки кислыми водами с высокой концентрацией железа, изливающимися из затопленных шахт Кизеловского угольного бассейна. Снимок Sentinel—2 в синтезе естественных цветов

Особым видом загрязнения воды является тепловое загрязнение - поступление большого объема подогретых вод (обычно с тепловых или атомных электростанций), что приводит к нарушению теплового и ледового режима водоемов. Источник теплового загрязнения может быть обнаружен по снимкам теплового диапазона спектра, полученным в период, когда естественная температура воды в водоеме достаточно низкая, например, поздней осенью. В этом случае температура водной массы вблизи источника подогретых вод будет иметь больший контраст с водой, сохраняющей естественный температурный режим водоема.