

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТЕМАТИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ
И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ
СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Одобрено Федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненным группам специальностей и направлений подготовки 05.00.00 Науки о Земле в качестве электронного учебного пособия для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования уровней бакалавриат и магистратура направления 05.00.03 Картография и геоинформатика



Пермь 2020

УДК 528.88
ББК 26.17
Т32

Т32 **Тематическое** дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2020. – 49,6 Мб ; 191 с. : ил. – Режим доступа : <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>. – заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-3476-7

Учебное пособие посвящено дешифровочным признакам, используемым для распознавания и анализа природных и антропогенных объектов, процессов и явлений по многозональным спутниковым снимкам среднего и высокого пространственного разрешения. В пособии представлено более 100 примеров дешифрирования с указанием характерных признаков и выводов по интерпретации изображений. Большинство примеров основано на свободно распространяемых данных со спутников Landsat-8 Sentinel-2A/2B. Также использованы снимки с коммерческих спутников SPOT-6/7, предоставленные группой компаний «СКАНЭКС».

Пособие предназначено для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлению 05.00.03 «Картография и геоинформатика». Оно также будет полезно для широкого круга специалистов, использующих данные космической съемки для решения научных и практических задач.

УДК 528.88
ББК 26.17

Издается по решению ученого совета географического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета

Рецензенты

кафедра картографии и геоинформационных систем Института наук о Земле Тюменского государственного университета (зав. кафедрой, к.г.н., доцент И. Р. Идрисов);

руководитель дирекции по разработке тематических проектов ООО ИТЦ «СКАНЭКС» М. В. Зимин

ISBN 978-5-7944-3476-7

© ПГНИУ, 2020
© Шихов А.Н., Герасимов А.П.,
Пономарчук А.И., Перминова Е.С., 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Космические снимки и их дешифрирование	8
1.1. Основные свойства космических снимков.....	8
1.2. Понятие о дешифрировании снимков.....	19
1.3. Дешифровочные признаки.....	21
1.4. Соотношение масштаба и пространственного разрешения.....	23
2 Краткие сведения о спутниковых данных среднего и высокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне	25
2.1. Данные спутников серии Landsat и SENTINEL-2.....	25
2.2. Данные спутников SPOT 6/7.....	28
2.3. Основные комбинации спектральных каналов, используемые для визуального дешифрирования (на примере данных Landsat-8).....	29
3 Тематическое дешифрирование объектов, процессов и явлений по снимкам среднего и высокого разрешения	34
3.1. Экзогенные геоморфологические процессы и формы рельефа.....	34
3.2. Почвенный покров.....	53
3.3. Снежно-ледовые поверхности.....	64
3.4. Гидрографическая сеть.....	74
3.5. Лесная растительность, породный состав и возрастная структура лесов.....	95
3.6. Лесохозяйственная деятельность.....	108
3.7. Нарушения лесного покрова, вызванные природными факторами.....	116
3.8. Естественная нелесная растительность.....	128
3.9. Сельскохозяйственные угодья.....	138
3.10. Деградация сельскохозяйственных угодий.....	149
3.11. Промышленные и техногенные объекты. Загрязнение природной среды.....	163
Заключение	186
Литература	187

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование Земли в настоящее время является наиболее интенсивно развивающимся способом получения актуальных и объективных данных о процессах и явлениях, происходящих в различных геосферах Земли. В свою очередь, дешифрирование данных ДЗЗ становится одним из важнейших методов для большинства наук о Земле.

Дистанционное зондирование охватывает целый ряд направлений науки, техники и технологий, развивавшихся на протяжении более сотни лет. Это с неизбежностью породило многообразие используемых терминов, обсуждением которых уместно предварить содержательную часть. Рассмотрим основные понятия, опираясь при этом как на исчерпывающие трактовки [5], так и на более простые формулировки, понятные в контексте обсуждаемой темы [20, 23, 24].

Аэрокосмический снимок принято трактовать как «двумерное изображение, полученное в результате съемки, выполненной специальной аппаратурой с воздуха или из космоса» [20]. Вне зависимости от способа получения изображения (фотография как результат фотохимических процессов, электронный кадровый или сканерный снимок как результат фотоэлектрических процессов), двумерное изображение действительно является основным (но не исчерпывающим все варианты) исходным материалом для дешифрирования. Так, лидарная съемка (воздушное лазерное сканирование) дает *трехмерное облако точек*, на основе которого путем специальной обработки можно получить двумерное изображение как один из вариантов представления результата. Радиолокационная съемка исторически также связана с определением расстояний (до цели), а ее отображение на двумерной плоскости бывает весьма сложно трактовать как «изображение» в силу физической природы данных, совершенно отличной от привычных нам понятий (яркость точки на радиолокационном снимке, как правило, не соответствует яркости объекта). Тем не менее и лидарная, и радиолокационная съемка также включаются в контекст дешифрирования.

С учетом указанных особенностей различных видов съемки, термин *аэрокосмическая съемка* корректнее заменить на более общий *дистанционное зондирование Земли* (ДЗЗ); в английском варианте – *Earth Remote Sensing* (ERS). Такой термин не ограничивает нас понятием «снимок» или «двумерное изображение» и включает все виды информации, получаемые с помощью фиксации

электромагнитного излучения удаленно, т.е. без непосредственного контакта с объектом исследования. В настоящее время оба варианта применяются фактически равнозначно.

Термин «дешифрирование», согласно простой формулировке, означает «процесс распознавания объектов, их свойств и взаимосвязей по их изображениям на снимке» [20]. Согласно более полному определению, дешифрирование – это процесс изучения по аэро- и космическим изображениям территорий, акваторий и атмосферы, основанный на зависимости между свойствами дешифрируемых объектов и характером их воспроизведения на снимках. В англоязычной литературе в качестве аналога термину «дешифрирование» обычно используется «анализ и интерпретация изображений» (image analysis and interpretation).

Содержанием и задачей дешифрирования является получение определенного объема качественной и количественной информации о состоянии, составе, структуре, размерах, взаимосвязях и динамике процессов, явлений и объектов с помощью *дешифровочных признаков*. Различают *визуальное дешифрирование* (visual image interpretation), *инструментальное* или *измерительное дешифрирование* (image measuring) и автоматическое дешифрирование. По содержанию дешифрирование может быть общегеографическим (топографическим), тематическим (например, геологическим, геоботаническим, почвенным) или специальным (мелиоративным, лесоустроительным и т.п.).

С учетом того, что современные технологии использования космических снимков предусматривают цифровую обработку данных, фактически *инструментальное* или *измерительное* дешифрирование частично сводится теперь к элементарным расчетам геометрических свойств дешифрируемых объектов. Таким образом, остается два основных вида дешифрирования – *визуальное* (экспертное) и *автоматическое* (автоматизированное). Последнее включает задачи классификации изображений (image classification), распознавания образов (pattern recognition, computer vision) и, в итоге, машинного обучения (machine learning) как перспективного направления, обеспечивающего процесс самообучения алгоритмов распознавания. Стремительный рост объемов данных ДЗЗ с неизбежностью порождает высокую востребованность в машинных средствах автоматической обработки.

Вне зависимости от растущей доли и объемов автоматического дешифрирования всегда будет важно умение быстро, эффективно и по возможности безошибочно интерпретировать снимки, то есть выполнять *визуальное дешифрирование*. В контексте этой задачи ключевым является понятие «дешифровочные признаки» – элементы изображения, определяющие возможность корректной интерпретации и, следовательно, последующего картографиро-

вания местности. Различают прямые (элементы изображения самого объекта) и косвенные (элементы изображения, помогающие распознаванию дешифрируемого объекта) дешифровочные признаки, успешное использование которых зависит от опыта эксперта. Соответственно, принято выделять *прямое* (прямые дешифровочные признаки) и *индикационное* (косвенные дешифровочные признаки, индикаторы) дешифрирование.

Для накопления и последующей передачи опыта использования прямых и косвенных дешифровочных признаков, очевидно, требуются примеры успешного дешифрирования, сопровождаемые исчерпывающими пояснениями. Целью создания настоящего пособия как раз и является систематизация опыта экспертов по визуальному дешифрированию. Пособие включает многочисленные примеры дешифрирования различных объектов по мультиспектральным снимкам, с указанием дешифровочных признаков и выводов по интерпретации соответствующих элементов изображений, сделанных на их основе. Рамки использованных примеров ограничиваются изображениями, полученными в оптическом диапазоне, т.е. от видимого участка электромагнитного спектра до среднего инфракрасного (ИК) диапазона.

Существует обширная литература, посвященная методологии визуального (экспертного) дешифрирования и его практическому применению, в том числе – атласов дешифрирования. В частности, еще в 2005 г. Инженерно-технологическим центром «СканЭкс» было подготовлено иллюстрированное пособие [11]. Несколько пособий опубликованы на сайте Межуниверситетского аэрокосмического центра при Географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова [21]. На сайте департамента природных ресурсов Канады представлено онлайн руководство по основам дистанционного зондирования (Fundamentals of Remote Sensing), также включающее примеры дешифрирования оптических и радиолокационных материалов космической съемки [34].

Отдельной темой является подбор вариантов цветового синтеза – комбинаций спектральных каналов, используемых для дешифрирования тех или иных свойств почвенного и растительного покрова, горных пород и водных объектов. Ближний и средний ИК диапазоны, как правило, дают гораздо больше информации, чем видимая часть электромагнитного спектра. Обзор примеров использования вариантов цветового синтеза на примере съемочной системы LANDSAT-8 на русском и английском языках представлен источниками [12, 29], а инструмент визуализации [30] позволяет непосредственно просматривать фрагмент изображения Земли в любой из 343 комбинаций из 7 спектральных каналов сенсора OLI спутника LANDSAT-8, имеющих пространственное разрешение 30 метров на пиксел.

Результаты картографирования географических и геологических объектов, выполненные с применением материалов космической съемки, представлены атласами [8, 9, 14, 16] – сборниками изображений поверхности с приложением подробных описаний соответствующих элементов. Подобные атласы также являются ценным ресурсом для получения навыков тематического визуального дешифрирования. Достаточно широкий обзор технологий и методов тематического картографирования, осуществляемого путем дешифрирования данных космической съемки и непосредственных наблюдений, представлен в книге [23], описывающей опыт многолетнего исследования поверхности Земли с борта международных космических станций.

Перечень тематических направлений использования материалов дистанционного зондирования исключительно широк, и представленный выше краткий обзор источников по визуальному дешифрированию является далеко не полным.

1

КОСМИЧЕСКИЕ СНИМКИ
И ИХ ДЕШИФРИРОВАНИЕ1.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА КОСМИЧЕСКИХ
СНИМКОВ

ДЗЗ из Космоса развивается уже на протяжении 60-ти лет. Первый спутник, выведенный на орбиту в целях дистанционного зондирования в 1960 г. (американский TIROS), имел гидрометеорологическое назначение. Также с начала 1960-х гг. развивались сначала военные (разведывательные), а позже и гражданские программы аналоговой (фотографической) съемки Земли. Наиболее значимой была программа Ресурс-Ф, в рамках которой в СССР и постсоветской России было произведено более 100 запусков космических аппаратов в период с середины 1970-х до конца 1990-х гг.

Первым космическим аппаратом, который позволял получать цифровые снимки на основе оптико-механического сканирования, стал американский спутник Landsat-1 с сенсором Multi-Spectral Scanner (MSS). Он был выведен на орбиту в 1972 г и позволял получать снимки с пространственным разрешением 80 м в четырех спектральных зонах. С 1980-х гг. съемочная аппаратура спутников ДЗЗ уже имела характеристики, приближенные к современным, а число стран, которые развивали технологии цифровой космической съемки, начало увеличиваться. В настоящее время на орбите находится уже несколько сотен космических аппаратов ДЗЗ, которые принадлежат десяткам стран. Также в последнее десятилетие XX в. произошел переход к цифровым технологиям обработки данных ДЗЗ.

Основными техническими характеристиками современных данных ДЗЗ являются параметры, описывающие чувствительность или точность регистрации различных свойств объектов. Общепринятым термином является «разрешение» (resolution): *пространственное, спектральное, радиометрическое и временное*. Также большое значение имеют *обзорность* или *ширина полосы обзора* и *сезонность съемки*.

Пространственное разрешение характеризует *детальность* съемки и обычно измеряется в *метрах на пиксел* (м/пикс, m/rx), имея в виду линейный размер участка земной поверхности **PIX**,

соответствующий пикселу – минимальному элементу цифрового изображения. Следует понимать условность этой характеристики: обычно под пикселом подразумевается квадратный элемент изображения, яркость которого определяется интегральной величиной количества электромагнитной энергии, попавшей на чувствительный элемент сенсора (регистрирующего прибора). На самом деле элементы светочувствительного сенсора (матрицы) не являются квадратными, так же, как и соответствующие им участки земной поверхности. Последнее может быть обусловлено как технологией регистрации изображения (при сканерной съемке размеры элементарного участка вдоль и поперек траектории движения съемочного аппарата различаются), так перспективными искажениями при отклонении оси съемочной системы от надира.

Следует иметь в виду, что размер пиксела является величиной, определяющей возможность *прямого* дешифрирования (различения) объектов местности по их изображению. Установлено, что «...на цифровом снимке могут воспроизводиться только те объекты, размер изображения которых в 1.5-2 раза больше пиксела, а для надежного воспроизведения компактного объекта его размер должен быть не менее четырех пикселей; для того чтобы различались компактные объекты разной формы, их площадные размеры должны составлять десятки пикселей...» [13]. При использовании *косвенных* дешифровочных признаков возникают дополнительные возможности, обсуждаемые ниже.

В научной литературе широко применяется классификация космических снимков по пространственному разрешению. По мере совершенствования спутниковых съемочных систем она претерпевала существенные изменения (см. напр. классификацию, приведенную в [20]). Наиболее часто используемая классификация снимков по пространственному разрешению приведена в табл. 1.1.1. На рис. 1.1.1 – 1.1.6. приведены примеры снимков различного пространственного разрешения согласно данной классификации.

Таблица 1.1.1
Классификация снимков по
пространственному разрешению

Классификация снимков	Разрешение (м)
Сверхвысокого разрешения	До 1
Высокого разрешения	1 – 10
Среднего разрешения	10 – 30
Низкого разрешения	30 - 250
Очень низкого разрешения	250 - 3000



Рис. 1.1.1. Пример снимка сверхвысокого разрешения: WorldView-2, 0,46 м (панхроматический); 1,85 м (мультиспектральный)



Рис. 1.1.2. Пример снимка высокого разрешения: SPOT 6-7, 1,5 м (панхроматический); 6 м (мультиспектральный)

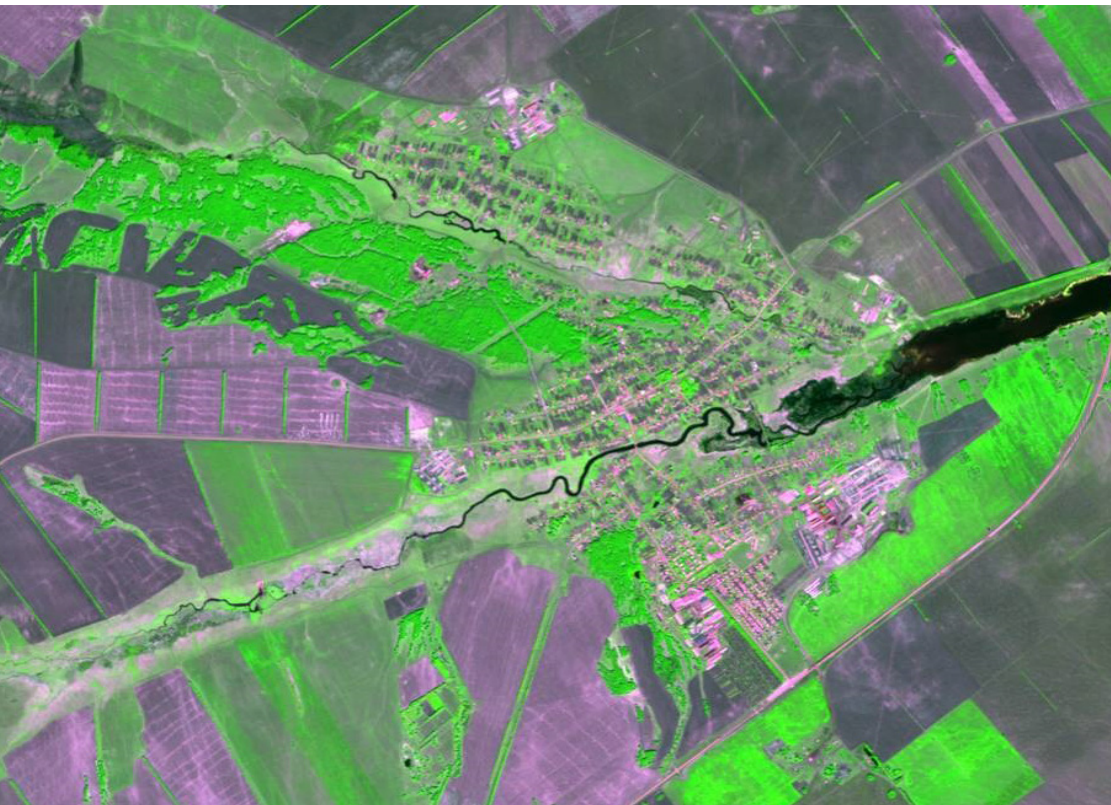


Рис. 1.1.3. Пример снимка высокого разрешения: SPOT 5, 2,5 м (панхроматический); 10 м (мультиспектральный)



Рис. 1.1.4. Пример снимка среднего разрешения: LANDSAT-8, 15 м (панхроматический); 30 м (мультиспектральный)



Рис. 1.1.5. Пример снимка низкого разрешения:
MODIS/Terra, 250 м

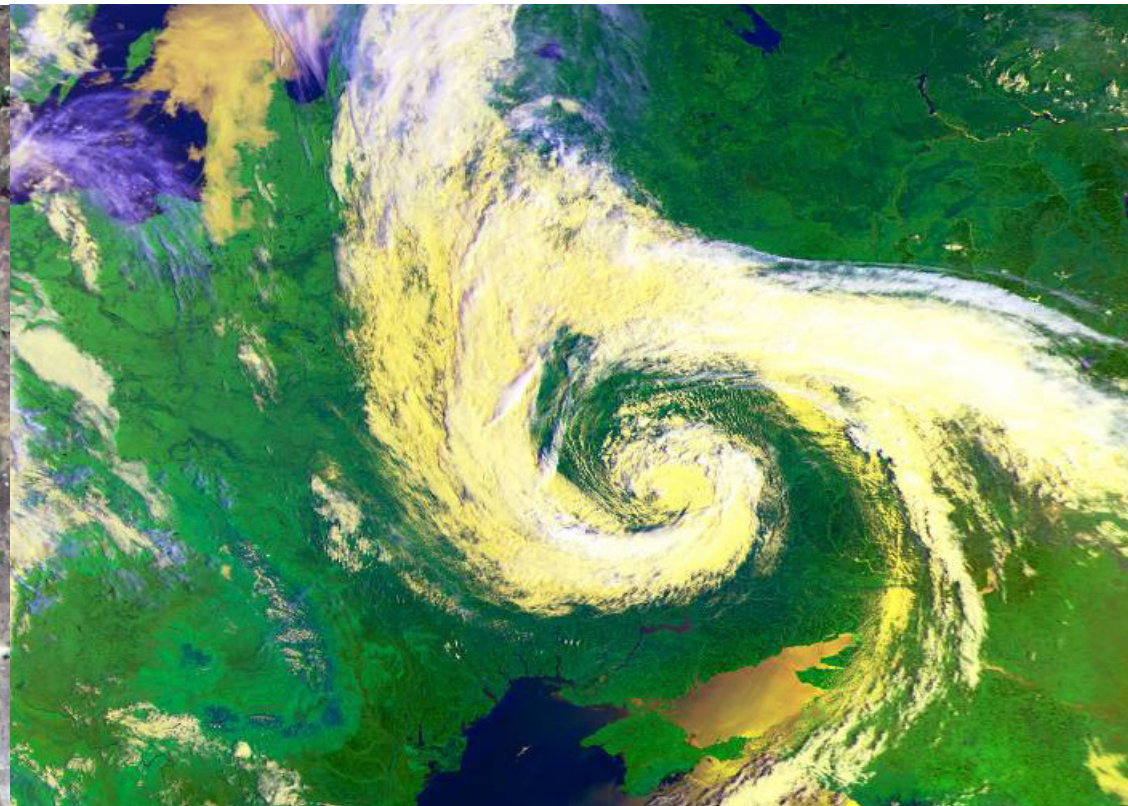


Рис. 1.1.6. Пример снимка очень низкого разрешения:
AVHRR/NOAA, <1 км

Спектральное разрешение определяется шириной спектральных зон (полос, каналов) съемки и измеряется в единицах длины волны, т.е. в *нанометрах* (нм, 10^{-9} м) или *микрометрах* (мкм, 10^{-6} м). Часто под спектральным разрешением понимается комплексная характеристика, включающая не только ширину, но и конкретный набор спектральных каналов, их количество. Наиболее низкое спектральное разрешение имеют *панхроматические* снимки (до 400 нм, в видимом диапазоне спектра), наиболее высокое – *гиперспектральные* снимки, включающие десятки и сотни спектральных полос, шириной порядка 10 нм.

В большинстве случаев существует обратная зависимость между спектральным и пространственным разрешением вследствие того, что согласно статистическим оценкам, одно и то же качество снимка (соотношение сигнал/шум) обеспечивается в среднем при одинаковом количестве измерений, т.е. количестве фотонов (N), приходящихся на единицу площади сенсора. На практике это сводится к тому, что панхроматический канал, собирающий энергию с максимально широкого спектрального диапазона, будет иметь пространственное разрешение в 2-4 раза выше, чем у монохромных каналов видимого диапазона. Для гиперспектральных снимков коэффициент снижения пространственного разрешения будет значительно выше.

Путем цифровой обработки мультиспектрального снимка можно довести пространственное разрешение «цветных» каналов до уровня панхроматического канала. Преобразования такого типа обеспечивают *повышение пространственного разрешения* путем *объединения изображений* (в англоязычной литературе *pan-sharpening* или *image fusion*). Повышение пространственного разрешения сопровождается изменением гистограммы изображения, что в свою очередь нарушает зависимости между свойствами объектов земной поверхности и их спектральными характеристиками. Это затрудняет процедуры (автоматического дешифрирования), поэтому повышение пространственного разрешения производится, как правило, в целях последующего визуального дешифрирования.

Преимуществом мультиспектральной (не более примерно 10 каналов) и гиперспектральной (десятки и сотни каналов) съемки является возможность получения *кривой спектральной яркости*, что может являться способом дешифрирования объектов земной поверхности на уровне отдельного пиксела. При условии однородности участка *PIX* (например, весь участок представлен растительностью одного типа с одинаковыми коэффициентами отражения) набор отсчетов яркостей по каналам позволяет получить приближение кривой спектральной яркости, которая может быть сопоставлена с каталогом (например, [18]) для ее идентификации.

Типичные примеры мультиспектральных данных дают сенсоры спутников серий Landsat и Sentinel-2, включающие диапазоны видимого и ИК излучения, в том числе теплового излучения с длинами волн 10,5-12,5 мкм. Подробнее каналы спутников рассмотрены в разделе 2.1 настоящего пособия. В литературе принято обозначать спектральные каналы как Blue, Green, Red, NIR («синий», «зеленый», «красный» и ближний ИК каналы), SWIR (каналы среднего или коротковолнового ИК диапазона, т.е. Short Wave Infrared Channel) и PAN (панхроматический канал). Границы спектральных диапазонов указаны в технических характеристиках съемочной аппаратуры, для разных сенсоров они обычно несколько различаются. Пространственное разрешение тепловых каналов (TIR) всегда ниже разрешения VNIR и SWIR вследствие высокого уровня шума в данном диапазоне.

Радиометрическое (яркостное) разрешение определяется числом уровней (градаций) яркости, регистрируемых датчиком – приемником излучения, и фактически определяет точность измерения яркости (рис. 1.1.7). Радиометрическое разрешение обычно выражается в битах или степенях двойки (2 уровня – 2^1 , 1 бит; 4 уровня – 2^2 , 2 бит; 16 уровней – 2^4 , 4 бит и т.д.). Еще недавно радиометрическое разрешение большинства съемочных систем составляло 8 бит (256 градаций яркости), современные съемочные системы имеют радиометрическое разрешение 16 бит.

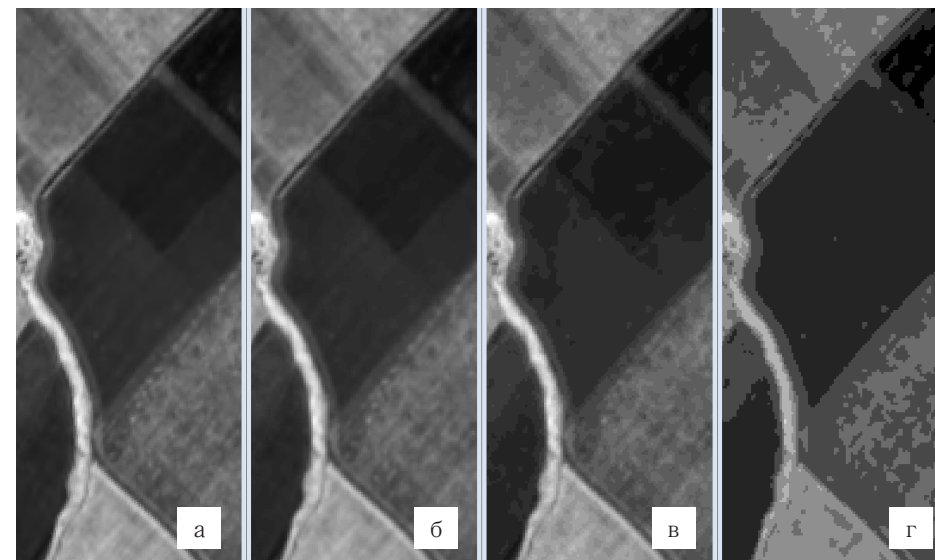


Рис. 1.1.7. Радиометрическое разрешение:

а) 12 bits (0 ... 4095), в) 6 bits (0 ... 63),
б) 8 bits (0 ... 255), г) 4 bits (0 ... 15)

Временное разрешение определяется периодичностью, с которой можно получать изображение выбранного участка земной поверхности одной и той же съемочной системой, т.е. это интервал времени между повторными съемками. Данная характеристика определяется совместным действием ряда факторов – периодичностью повторения орбиты относительно данного участка земной поверхности, шириной полосы обзора съемки и допустимыми углами отклонения камеры (если оно вообще возможно) от направления надира. Фактически к этому следует добавить состояние облачности, наличие которой на очередном витке будет полностью или частично препятствовать съемке.

В задачах мониторинга поверхности Земли существует два основных режима съемки: *маршрутная* и *прицельная* (выборочная). В первом случае съемка производится строго вдоль трассы полета спутника (по маршруту), а ширина полосы обзора определяется высотой над поверхностью Земли и углом обзора, что напрямую связано с масштабом или детальностью съемки – чем меньше угол обзора (и соответственно больше фокусное расстояние объектива), тем выше детальность и меньше ширина полосы обзора. На практике наибольшее распространение получила глобальная (маршрутная) съемка, обеспечивающая полное покрытие поверхности Земли. Примером являются спутники серии LANDSAT, орбиты которых являются круговыми (высота 705 км) полярными квазипериодическими и солнечно-синхронными с полным циклом повторения траекторий 233 оборота (16 суток, что примерно и соответствует частоте повторной съемки в экваториальной зоне). Квазипериодичность (число оборотов за сутки не является целым) обеспечивает смещение полос съемки за счет суточного вращения Земли, а солнечная синхронность – одинаковые условия солнечного освещения (высота Солнца над горизонтом) в течение длительного промежутка времени. Пространственное разрешение каналов в видимом и ближнем ИК диапазонах составляет 30 м/пикс (15 м/пикс для панхроматического канала) при ширине полосы съемки 185 км.

Для спутников высокого и сверхвысокого разрешения ширина полосы съемки намного меньше (например, 13,1 км для спутника WorldView-3 с пространственным разрешением 0,3 м/пикс), что означало бы неприемлемо низкое временное разрешение в режиме маршрутной съемки. Для аппаратов такого рода применяется *прицельная* съемка участков местности по заранее составленной программе, при этом отклонение камеры от надира может достигать 40° и более. За счет этого частота повторной съемки повышается до 4,5 суток (на широте 40° и при отклонении от надира не более 20°).

1.2. Понятие о дешифрировании снимков

В соответствии с задачами пособия акцент делается на визуальном дешифрировании, а методы автоматического дешифрирования будут упоминаться лишь по мере необходимости. Важнейшим принципом визуального дешифрирования является анализ дешифрируемых объектов в *развитии* и в *контексте окружающей среды*, а также – движение *от общего к частному*, путем последовательного изучения снимка как информационной модели местности, представляемой как единое целое [13, 20, 24]. Основным фактором, определяющим качество визуального дешифрирования, является уровень квалификации эксперта, слагаемый из профессиональной эрудиции и его интуиции – утверждается даже, что данный вид деятельности граничит с искусством. Тем не менее, и здесь существует определенная методология, направленная на повышение достоверности и снижение числа ошибок.

Космический снимок представляет собой образную модель местности – результат *генерализации*, характер которой существенно отличается от модели, получаемой в процессе картографической генерализации [20]. Мелкие детали местности теряются и, наоборот, на снимке проявляются крупные структуры, не видимые на поверхности вследствие своего размера. Снимок содержит только то, что может быть зафиксировано в используемом спектральном диапазоне на данный момент времени при текущих условиях погоды и освещения. В этом смысле снимок является документом, лишенным субъективности картографического изображения, подчиняющегося правилам отбора объектов и способам их отображения.

Процесс дешифрирования снимков и используемые приемы всегда носят предметно ориентированный характер, т.е. зависят от типа дешифрируемых объектов. В частности, выделяют топографическое, ландшафтное, геоморфологическое, гидрологическое и другие виды дешифрирования. Соответственно каждому виду подбираются оптимальные съемочные материалы, в основном по уровню детальности (пространственного разрешения), наличию видимых и ИК каналов (спектральное разрешение), обеспечивающих наилучшее различение дешифрируемых объектов. Учет и анализ динамики изменений требует также наличия разновременных снимков.

Типичный съемочный материал характеризуется как избыточностью, так и недостатком информации, для восполнения которой необходимо привлечение знаний из других источников. В целом методология дешифрирования предусматривает наличие следующих этапов:

- 1) изучение опыта и рекомендаций по данному виду дешифрирования и по конкретной местности;
- 2) выявление набора объектов дешифрирования (объектов интереса) и присущих им дешифровочных признаков;
- 3) подбор съемочного материала и вычислительных средств (компьютерных программ), позволяющих использовать выявленные дешифровочные признаки объектов интереса;
- 4) дешифрирование снимков и оценка достоверности результатов;
- 5) оформление результатов дешифрирования.

Принято выделять две принципиально разные схемы дешифрирования [13, с. 143], различающиеся порядком процедур различения (распознавания) и графическим выделением объектов на снимке. В первой схеме, характерной для топографического дешифрирования, объекты вначале распознаются. Вторая схема применяется для задач, в которых невозможно заранее определить тип объекта по его изображению, что характерно, например, для распознавания видов почвенного покрова или видов растительности. Само отличие по прямым или косвенным признакам на снимке заметно, но для интерпретации различающихся участков необходимы дополнительные данные от полевых исследований или иных источников.

Для полноты картины следует понимать, что в реальной работе практически повсеместно используется *интерактивное* дешифрирование, сочетающее этапы автоматизированного и визуального дешифрирования, иначе говоря – чередующиеся этапы автоматизированной классификации изображений, оценки и корректировки их результатов силами эксперта-дешифровщика. В случае первой схемы объекты дешифрирования явно различаются на снимке; при этом можно часть объектов использовать в качестве эталонов (обучающих образцов) для классификации всего изображения, т.е. автоматического выделения аналогичных объектов. Таким образом, мы получаем пример классификации с обучением. Роль эксперта сводится здесь к анализу результатов автоматической классификации и последующему улучшению путем корректировки эталонов, методов классификации и т.п. Во второй схеме этап автоматической обработки будет заключаться в классификации без обучения, т.е. кластеризации изображения – выделении

фрагментов, существенно отличающихся по своим статистическим спектральным характеристикам. В этом случае эксперт выполняет интерпретацию результатов путем соотнесения получившихся кластеров с реальными объектами, а также вносит корректировки в параметры кластеризации для следующей итерации.

Описанная выше схема интерактивного дешифрирования сильно упрощена и соответствует в основном наиболее простой в применении попиксельной классификации. В реальности могут добавляться различные методы предварительной подготовки изображений, методы объектно-ориентированной классификации, элементы машинного обучения и т.п. При этом следует подчеркнуть, что, несмотря на активное развитие методов автоматизированной классификации изображений, роль эксперта-дешифровщика в получении достоверных результатов остается центральной.

1.3. ДЕШИФРОВОЧНЫЕ ПРИЗНАКИ

Использование дешифровочных признаков для распознавания (различения) объектов является основой дешифрирования. Принято выделять *прямые* и *косвенные* дешифровочные признаки [5, 13, 20]. К прямым относятся признаки, присущие изображению самих объектов (например, их геометрические и спектральные характеристики). Косвенные, или *индикационные* дешифровочные признаки, характеризуют объект дешифрирования опосредованно, через какой-либо другой природный или искусственный компонент окружающей среды.

Прямые дешифровочные признаки могут быть *простыми* и *сложными*. Прямые простые признаки включают такие характеристики, как *форма*, *размер*, *цвет*, *тон* изображения (яркость, brightness), *тень* (shadow, shade). Прямые сложные дешифровочные признаки – *структура* (structure, composition) и *текстура* (texture), что иногда объединяют под одним названием *рисунок* изображения. Текстура обусловлена взаимным закономерным расположением тоновых неоднородностей изображения и может быть тонкосетчатой, полосчатой, однородной, пятнистой и т.п. Хорошим примером последней является вид возделываемых сельскохозяйственных полей, явно отличающихся от естественных природных участков с похожей или аналогичной растительностью именно за счет характерной текстуры. Прямые дешифровочные признаки и используются при *прямом* (непосредственном) дешифрировании [13, с. 145].

Использование прямых дешифровочных признаков в видимом диапазоне доступно дешифровщикам любой квалификации и достаточно очевидно. Тем не менее, имеет смысл остановиться на некоторых особенностях. В частности, простейшее свойство – тон изображения (яркость изображения), который может определяться не только яркостью объектов (как это подсказывает нам здравый смысл), но и зависеть от их температуры (в тепловом диапазоне), шероховатости, влагосодержания и даже свойств падающего излучения (в радиоволновом диапазоне). **Форма** объектов искусственного происхождения обычно имеет элементы простой геометрии (прямые углы, дуги постоянного радиуса и т.п.), природные образования также могут характеризоваться специфически узнаваемыми элементами. **Размер** чаще всего определяется по снимкам высокого разрешения и может давать прямое указание на соответствующие объекты. **Тон** объекта на изображении, особенно в видимом диапазоне, позволяет легко выделять снег, открытый грунт и растительность, водные поверхности и т.п. Значения яркости объекта в разных каналах могут быть сопоставлены с кривой спектральной яркости, что часто позволяет идентифицировать объект по единственному пикселу. Комбинация яркостей в каналах R, G, B дает нам **цвет** объекта, который также относится к числу наиболее простых и понятных дешифровочных признаков. **Тень** объекта, как правило, имеет высокий контраст, позволяя обнаруживать высокие объекты малого размера. **Рисунок изображения** относится к устойчивым сложным признакам, объединяющим характерную текстуру и структуру изображения объекта.

Отдельную разновидность представляет *морфометрическое дешифрирование*, основанное на статистическом анализе пространственного распределения таких прямых признаков, как форма, размер, текстура и структура. В качестве примера морфометрического дешифрирования в задачах лесотаксации можно привести определение бонитета древостоев, получаемое в результате анализа статистической зависимости диаметра крон деревьев и их сомкнутости [13, с. 147]. Другой пример из области геолого-геоморфологических исследований – анализ линеаментов (длина, направление, густота), позволяющий оценивать сейсмическую опасность территории.

Косвенные дешифровочные признаки основаны на связях (корреляциях) между видимыми и невидимыми свойствами объектов, при этом видимый объект является *индикатором*, указывающим на наличие невидимого. Успешность *косвенного* или *индикационного* дешифрирования существенно зависит от опыта и квалификации дешифровщика. В качестве индикатора чаще всего выступают растительный покров, рельеф и гидрография. Косвенные признаки широко используются при ландшафтном

дешифрировании, причем по мере уменьшения масштаба их роль возрастает – так, вследствие *генерализации* космических снимков мелкие детали, прямые признаки которых, например, формы рельефа, исчезают, уступая место крупным структурам, дешифрируемым по косвенным признакам – например, тип растительности. Принято использовать индикационные таблицы, указывающие связи между типами (состояниями) индикаторов и соответствующих дешифрируемых (невидимых) объектов. Как уже отмечалось, грамотное использование индикаторов связано с квалификацией эксперта, и именно эта область дешифрирования сравнивается с искусством. Так, в качестве примера необычного дешифровочного признака можно привести облачность, а именно – гряды кучевых облаков, указывающие на наличие тектонического разлома. Исследования показали, что данная корреляция обусловлена потоками тепла над разломами.

Перечисленные выше прямые и косвенные признаки и основанные на них методы дешифрирования дают только краткую схему реальных работ, всегда опирающихся на специфику конкретной предметной области и соответствующие компетенции. При этом очевидно, что в силу возрастания массовой потребности в продуктах дешифрирования космических снимков наблюдается крен в сторону формальных математических методов обработки с применением современных алгоритмов, включая методы распознавания образов и искусственного интеллекта. Тем не менее, содержательная сторона вопроса и конечная результативность определяются уровнем экспертов-дешифровщиков. В учебном пособии [20] представлен более подробный обзор различных направлений дешифрирования, и в целом, истории развития и роли дешифрирования в составлении топографических и тематических карт.

1.4. СООТНОШЕНИЕ МАСШТАБА И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Основным назначением космической съемки является получение материалов, пригодных для извлечения из них картографической информации нужного уровня детальности. Оба источника данных (снимки и карты) являются графическими изображениями, полученными вследствие *генерализации*, т.е. обобщения. Так, для обновления масштабного ряда топографических карт принято использовать снимки соответствующих масштабов. Опыт топографического картографирования позволил сформули-

ровать требования к съёмочным системам, которые включают не только пространственное разрешение, но и точности определения плановых координат. Так, пространственное разрешение снимка, равное 30-45 м, обычно считается эквивалентом карты масштаба 1:200 000 [13]. Соответственно, общедоступные снимки со спутников серии Landsat (пространственное разрешение 30 м) могут использоваться для обновления карт масштаба 1:200 000, а по данным Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м можно обновлять карты масштаба 1:50 000 – 1:100 000. Однако критическое значение может иметь не только пространственное разрешение (определяющее возможность дешифрирования объектов местности) но и точность геометрической коррекции снимка, от которой зависит величина ошибок измерений.

Картографическая генерализация в корне отличается от генерализации космических изображений, обладающей рядом неочевидных особенностей. В первом случае производится целенаправленный отбор и обобщение изображаемых на карте объектов соответственно назначению и масштабу, содержанию карты и особенностям картографируемой территории, согласно так называемому цензу отбора. Во втором случае имеет место *естественная* или *визуальная генерализация* – явление, которое наблюдается с больших высот (т.е. характерно только для космических изображений) и подразделяется на два типа: *зрительную* и *иконическую*.

Зрительная генерализация имеет геометрический и оптический аспекты, обусловленные разными причинами. Так, физиологические особенности зрения приводят к тому, что при значительном удалении линейные объекты различаются лучше, чем точечные, что дает эффект «проявления» линейных структур, невидимых вблизи (геометрический аспект). Изменение соотношения сигнал/шум вследствие различных помех обуславливает оптический аспект зрительной генерализации [23, с. 199].

При увеличении высоты съёмки наблюдается также другой эффект – излучение крупных площадных объектов подавляет излучение мелких, что дает естественную интеграцию изображения, в том числе сглаживание контуров и слияние групп мелких объектов. Это принято называть проявлением *иконической* генерализации. Визуальная генерализация (зрительная и иконическая) является естественной, обусловлена объективными причинами и воспринимается как человеком-наблюдателем, так и регистрирующими приборами. При этом многие эффекты, возникающие в результате генерализации, остаются труднообъяснимыми. К ним относятся, например эффект «подповерхностного изображения» [23] и другие эффекты формирования крупномасштабных образов.

2

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

2.1. ДАННЫЕ СПУТНИКОВ СЕРИИ LANDSAT И SENTINEL-2

Как уже было отмечено выше, мультиспектральные снимки позволяют использовать различные варианты цветового синтеза для визуального и автоматизированного дешифрирования объектов земной поверхности. В настоящее время наиболее значительные объемы данных космической съёмки среднего разрешения обеспечиваются спутниками LANDSAT-5/7/8 и SENTINEL-2. Уместно привести краткую сопоставительную сводку спектральных каналов, используемых ниже для составления различных комбинаций для дешифрирования тех или иных объектов.

Спутник **LANDSAT-5** (запущен 01.03.1984), сенсор TM (Thematic Mapper). Имеет 7 спектральных каналов, из них 6 с разрешением 30 м/пикс в видимом и ближнем ИК (каналы 1-4), среднем ИК (каналы 5, 7) и один канал (6) с разрешением 120 м/пикс в тепловом диапазоне. Панхроматический канал отсутствует.

Спутник **LANDSAT-7** (запущен 15.04.1999), сенсор ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Имеет 8 каналов, из них 6 с разрешением 30 м/пикс в видимом и ближнем ИК (каналы 1-4), среднем ИК (каналы 5, 7), один канал (6) с разрешением 60 м/пикс в тепловом диапазоне, а также панхроматический канал (8) с разрешением 15 м/пикс.

Спутник **LANDSAT-8** (запущен 11.02.2013), сенсоры OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infrared Sensor). Имеет 11 каналов, из них 8 с разрешением 30 м/пикс в видимом, ближнем ИК

(каналы 1-5 и 9), и среднем ИК (номера каналов 6, 7), 2 канала (10, 11) с разрешением 100 м/пикс в тепловом диапазоне, а также панхроматический канал (8) с разрешением 15 м/пикс. Следует отметить, что канал 1 находится в ультрафиолетовой части спектра. Следующим шагом в развитии программы LANDSAT является спутник LANDSAT-9, запуск которого запланирован на декабрь 2020 года.

Спутники **SENTINEL-2 (A/B)** с сенсором MSI (Multispectral Instrument) являются частью программы Copernicus Европейского Космического Агентства (ESA, European Space Agency). Спутник SENTINEL-2A запущен 23.06.2015 г., а SENTINEL-2B – 07.03.2017 г. Орбиты обеспечивают возможность съемки в средних широтах северного полушария с частотой каждые 2-3 сут. Спутники имеют по 13 каналов, из них 4 с разрешением 10 м/пикс в видимом и ближнем

Таблица 2.1.1
Спектральные каналы съемочных систем
Landsat (TM/ETM+/OLI) и Sentinel-2 MSI [29, 32]

Landsat 5 TM		Landsat-7 ETM+	
Номер канала	Длины волны, мкм	Номер канала	Длины волн, мкм
1 (Blue)	0,45 – 0,52	1 (Blue)	0,45 – 0,515
2 (Green)	0,52 – 0,605	2 (Green)	0,525 – 0,605
3 (Red)	0,63 – 0,69	3 (Red)	0,63 – 0,69
4 (NIR)	0,76 – 0,90	4 (NIR)	0,76 – 0,90
5 (SWIR)	1,55 – 1,75	5 (SWIR)	1,55 – 1,75
6 (Thermal)	10,4 – 12,5	6 (Thermal)	10,4 – 12,5
7 (SWIR-2)	2,08 – 2,35	7 (SWIR-2)	2,08 – 2,35
		8 (Pan)	0,52 – 0,90

ИК (номера каналов 2-4, 8), 6 (номера 5-7, 8а, 11, 12) с разрешением 20 м/пикс в ближнем и среднем ИК диапазонах и еще 3 канала (1, 9, 10) с разрешением 60 м/пикс. Панхроматический канал отсутствует. Наибольший практический интерес представляют каналы R, G, B, NIR с разрешением 10 м/пикс, обеспечивающие сразу, без преобразований типа *pan-sharpening*, разрешение более высокое, чем дают снимки LANDSAT.

Характеристика каналов перечисленных выше спутников представлена в Табл. 2.1.1. Строки таблицы примерно соответствуют (в смысле, упомянутом выше в разделе «Основные свойства космических снимков») одинаковым каналам, что позволяет формировать близкие по информативности комбинации каналов разных съемочных систем. Особенности и сферы применения этих комбинаций обсуждаются в следующем разделе.

Landsat-8 OLI		Sentinel 2A MSI	
Номер канала	Длины волн, мкм	Номер канала	Длины волн, мкм
1 (Aerosol)	0,433 – 0,453	1 (Aerosol)	0,43 – 0,457
2 (Blue)	0,45 – 0,515	2 (Blue)	0,448 – 0,545
3 (Green)	0,525 – 0,60	3 (Green)	0,537 – 0,582
4 (Red)	0,63 – 0,68	4 (Red)	0,645 – 0,683
5 (NIR)	0,845 – 0,885	5 (Red Edge)	0,694 – 0,713
6 (SWIR)	1,56 – 1,66	6 (Red Edge)	0,731 – 0,749
7 (SWIR-2)	2,10 – 2,30	7 (Red Edge)	0,768 – 0,796
8 (Pan)	0,50 – 0,68	8 (NIR)	0,763 – 0,908
9 (SWIR – Cirrus)	1,36 – 1,39	8a (Narrow NIR)	0,848 – 0,883
		9 (Water vapour)	0,932 – 0,958
		10 (SWIR – Cirrus)	1,336 – 1,411
		11 (SWIR)	1,542 – 1,685
		12 (SWIR-2)	2,081 – 2,323

2.2. Данные спутников SPOT 6/7

Спутники SPOT-6 и SPOT-7 – два идентичных по характеристикам космических аппарата ДЗЗ, обеспечивающие съемку высокого пространственного разрешения. Они являются новым поколением спутников серии SPOT, которая насчитывает более чем 30-летнюю историю (с 1986 г.). Неоспоримым преимуществом группировки является высокая производительность – ежедневный объем съемки, производимой двумя спутниками, составляет 6 млн. км², что делает систему SPOT 6/7 основным инструментом формирования актуальных безоблачных и высокодетальных покрытий. Основные характеристики спутников SPOT 6/7 приведены в табл. 2.2.1.

Основные направления использования данных SPOT 6/7 включают в себя мониторинг экологического состояния территорий, контроль лесопользования, обновление топографической основы, инвентаризацию сельскохозяйственных угодий, мониторинг состояния посевов, мониторинг и прогнозирование процессов заболачивания и опустынивания, засоления, карста, эрозии, степных пожаров и т. п.

Таблица 2.2.1
Основные характеристики
спутников SPOT 6/7

Запуск	9 сентября 2012 года - SPOT-6 30 июня 2014 года – SPOT-7
Оператор	Airbus Defence and Space (Франция)
Каналы	Панхроматический (0,45 – 0,75 мкм) Голубой (0,45 – 0,52 мкм) Зеленый (0,53 – 0,59 мкм) Красный (0,63 – 0,70 мкм) Ближний инфракрасный (0,76 – 0,89 мкм)
Пространственное разрешение, м/пикс	1,5 м (панхроматический) 6,0 м (мультиспектральный)
Динамический диапазон, бит/пикс	12
Полоса обзора, км	60

2.3. Основные комбинации спектральных каналов, используемые для визуального дешифрирования
(на примере данных Landsat-8)

В зависимости от типа исследуемых по снимкам (картографируемых) объектов используются различные комбинации спектральных каналов, обеспечивающие максимальную различимость объектов по отношению к фону. В ряде случаев комбинации каналов применяются последовательно с целью поэтапного отделения объектов и их свойств. Стандартная комбинация в «естественных цветах» подразумевает размещение каналов R, G, B в соответствующих позициях (слотах) многоканального растра, рассматриваемого на экране компьютера (визуальное дешифрирование), либо обрабатываемого машинными методами классификации (автоматизированное дешифрирование). При визуальном дешифрировании на три слота растра могут помещаться любые спектральные каналы (особенно информативны ближний и средний ИК диапазоны), либо что-то еще – например, каналы разновременных снимков, результат расчета вегетационного индекса и т.п. При автоматизированном дешифрировании число каналов в многоканальном растре может быть больше трех. В данном разделе мы ограничимся кратким обзором наиболее распространенных комбинаций каналов, полученных одной съемочной системой.

Вначале целесообразно дать краткий обзор отдельных каналов с указанием объектов и их свойств, для которых обеспечивается наилучшая различимость (например, см. [12, 29]). Далее в тексте будет использоваться нумерация каналов спутника Landsat-8 (сенсоры OLI, TIRS); соответствующие номера для других для спутников можно взять из табл. 2.2.1.

Канал 1 (B, Coastal/Aerosol) – голубой и фиолетовый. Сильно рассеивается пылью и частицами атмосферы, используется для обнаружения дыма и тумана. Обеспечивает оценку «здоровья» биосферы океана по степени яркости.

Каналы 2, 3, 4 (Blue, Green, Red) – видимые цвета спектра.

Канал 5 (NIR) – невидимый ближний ИК канал. Обеспечивает оценку состояния растительности суши по степени яркости, что обусловлено сильным отражением здоровой растительности.

Каналы 6, 7 (Shortwave Infrared, SWIR-1/2) – инфракрасные каналы. Излучение сильно поглощается водой. Данные используются для различения видов растительности и почвы, облаков, снега и льда.

Канал 8 (PAN, Panchromatic) – панхроматический канал. За счет широкого диапазона (и большого количества энергии) обеспечивает максимальное пространственное разрешение 15 м/пиксел.

Канал 9 (Cirrus) обеспечивает различимость перистых и кучевых облаков.

Каналы 10, 11 (Thermal Infrared, TIR-1/2) – каналы дальнего ИК (теплого) диапазона, дающие информацию о температуре поверхности Земли.

Для исследований объектов на поверхности Земли наиболее востребованы каналы с номерами 1-7 с разрешением 30 м/пикс, общее число комбинаций которых составляет 343. Визуально эти комбинации можно оценить с помощью интерактивного инструмента [30], а особенности применения некоторых из них обсуждаются в источниках [12, 29]. Основные комбинации, их свойства и фрагменты снимков представлены ниже на рис. 2.3.1.

Синтез каналов 4-3-2 (Red, Green, Blue), «естественные цвета». Применяется для анализа состояния водных объектов и процессов седиментации, оценки глубины и изучения антропогенных объектов. Вырубки и разреженная растительность детектируются плохо, в отличие от комбинации 4-5-1 или 4-3-2. Облака и снег выглядят одинаково белыми и трудноразличимы. Кроме того, здесь трудно отделить один тип растительности от другого. Эта комбинация не позволяет отличить мелководье от почв. Объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Здоровая растительность выглядит зеленой, убранные поля – светлыми, нездоровая растительность – коричневой и желтой, дороги – серыми, береговые линии – белесыми.

Синтез каналов 5-4-3 (NIR, Red, Green), «искусственные», или «красные» цвета. Применяется для изучения состояния растительного покрова, мониторинга дренажа и почвенной мозаики, изучения сельскохозяйственных культур. Насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой и (или) широколиственной растительности, в то время как более светлые оттенки характеризуют травянистую растительность или редколесья/кустарники. Растительность в этой комбинации имеет оттенки красного, городская застройка – зелено-голубые цвета, почва – от темно до светло коричневого или серого, лед, снег и облака – белые или светло голубые. Хвойные леса по сравнению с лиственными имеют более темно-красную или даже коричневую окраску.

Синтез каналов 7-5-3 (SWIR, NIR, Green). Данная комбинация весьма полезна при анализе пустынь, может быть использована для изучения сельскохозяйственных земель и водно-болотных угодий. Пройденные пожарами территории выглядят ярко красными. Городская застройка отображается в оттенках розово-фиолетового.

Здоровая растительность выглядит ярко зеленой, травянистые сообщества – зелеными, ярко розовые участки детектируют открытую почву, коричневые и оранжевые тона характерны для разреженной растительности. Сухостойная растительность выглядит оранжевой, вода – голубой. Песок, открытая почва и минералы могут быть представлены большим числом цветов и оттенков.

Синтез каналов 5-6-2 (NIR, SWIR, Blue). Добавление SWIR канала обеспечивает различимость возраста растительности. Здоровая растительность отображается в оттенках красного, коричневого, оранжевого и зеленого. Почвы могут выглядеть зелеными или коричневыми, урбанизированные территории – белесыми, серыми и зелено-голубыми, ярко голубой цвет может детектировать недавно вырубленные территории, а красноватые – восстановление растительности или разреженную растительность. Чистая, глубокая вода будет выглядеть темно синей (почти черной), для мелководья или высокого содержания взвесей в цвете преобладают более светлые синие оттенки.

Синтез каналов 5-6-4 (NIR, SWIR, Red), «красные цвета». Применяется для анализа влажности, изучения почв и растительного покрова. В целом, чем выше влажность почв, тем темнее она будет выглядеть, что обусловлено поглощением водой излучения ИК диапазона. Комбинация позволяет четко различить границу между водой и сушей и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона. С большой точностью будут детектироваться водные объекты внутри суши. Растительность отображается в различных оттенках и тонах коричневого, зеленого и оранжевого.

Синтез каналов 7-6-4 (SWIR-2, SWIR-1, Red). Применяется для мониторинга пожаров, так как тепловые аномалии выглядят красноватыми или желтыми. Также хорошо выделяются затопленные территории. Они имеют темно-синий и почти черный цвет. Поглощение излучения в среднем ИК диапазоне водой позволяет четко выделять береговую линию и водные объекты на снимке. Растительность отображается в оттенках темно и светло зеленого, урбанизированные территории выглядят белыми, зелено-голубыми и малиновыми, почвы, песок и минералы могут иметь много разных цветов.

Синтез каналов 6-5-4 (SWIR, NIR, R) удобен для изучения растительного покрова и широко используется для анализа состояния лесных сообществ. Комбинация дает очень много информации и цветовых контрастов. Здоровая растительность выглядит ярко зеленой, а почвы – розовато-лиловыми. В отличие от синтеза 7-4-2, включающего канал SWIR2 и позволяющего изучать геологические процессы, эта комбинация дает возможность лучше различать и анализировать сельскохозяйственные угодья.

Основным отличием данных Sentinel 2A/2B от данных Landsat-8 по спектральному разрешению является наличие трех дополнительных каналов в диапазоне Red Edge (красный крайний) с длинами волны в диапазоне от 0,694 от 0,796 мкм и предназначенных преимущественно для изучения растительного покрова (см. табл. 2.2.1).

Таким образом, помимо вышеперечисленных комбинаций каналов, на основе данных Sentinel-2 можно создавать множество других вариантов цветового синтеза. С наиболее часто используемыми комбинациями каналов Sentinel-2 можно ознакомиться на сервисе (<https://eos.com/landviewer>).

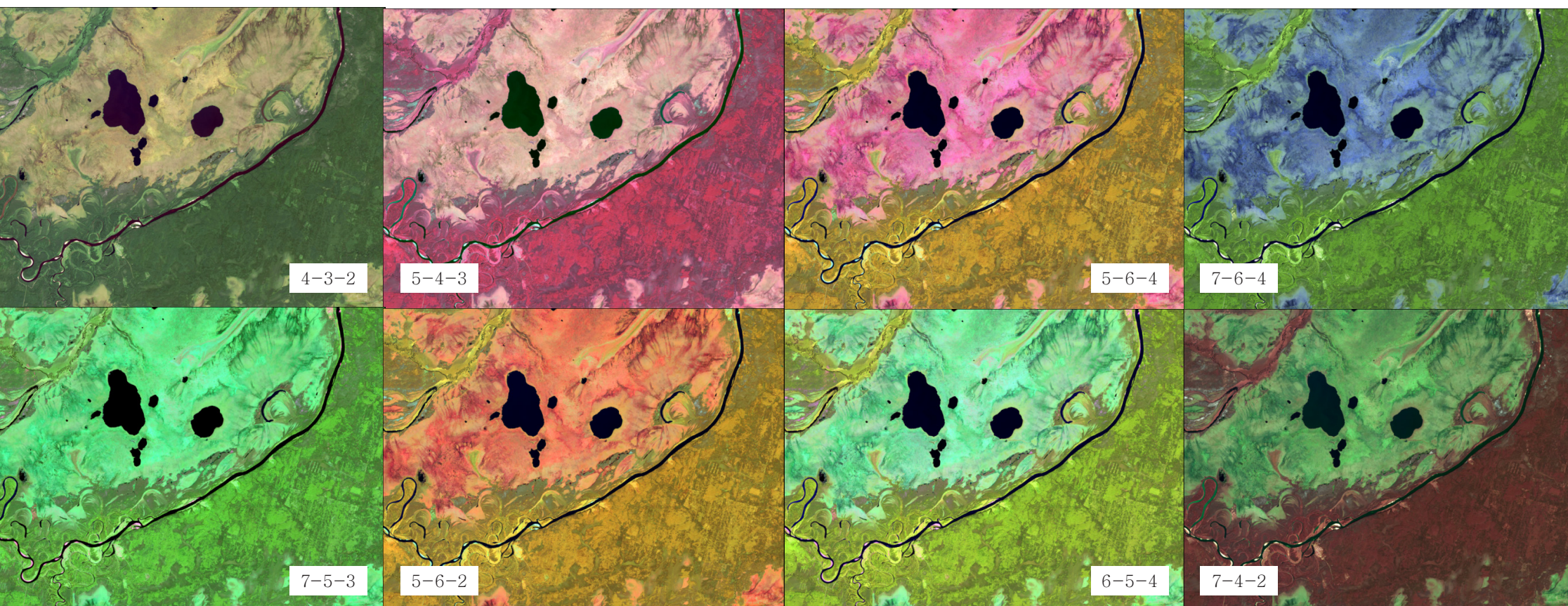


Рис. 2.3.1. Примеры различных комбинаций каналов снимка Landsat-8.

ТЕМАТИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ, ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ ПО СНИМКАМ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

3.1. ЭКЗОГЕННЫЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ФОРМЫ РЕЛЬЕФА

Исследование морфологических особенностей рельефа, его генезиса, возраста, динамики развития поддается дистанционным методам в разной степени. Наилучшим образом выражены на снимках морфологические черты рельефа. Морфологические особенности и отображающиеся на снимках элементы ландшафта, связанные с рельефом, позволяют по косвенным признакам (индикаторам) выявлять генезис (генетические типы) рельефа. Для изучения современной динамики рельефа в ряде случаев полезно сопоставление разновременных снимков. Такой анализ позволяет также судить об относительном возрасте рельефа, однако установить его непосредственно по снимкам невозможно. Оптимальная последовательность изучения рельефа по космическим снимкам выглядит так: морфология и морфометрия – генезис и динамика – относительный возраст и этапы развития [13].

Ниже рассмотрены основные морфологические особенности и косвенные признаки различных генетических типов рельефа, которые обуславливают особенности их отображения на космических снимках:

Гравитационные процессы и формы рельефа

Выделяют четыре основных типа склоновых процессов: обвально-осыпные, оползневые, процессы массового медленного перемещения обломочного материала и плоскостной смыв. Закономерности их распространения и интенсивность определяются рядом факторов: характером рельефа (высотой, глубиной расчленения, крутизной склонов), климатическими условиями, особенностями структуры, состава и дислоцированности пород, а также

воздействующими на склон процессами [22]. При этом собственно гравитационные (обвально-осыпные) процессы приурочены к склонам с крутизной более 30-35°.

Гравитационные образования, возникающие в результате перемещения элювиально-делювиальных масс, а также отдельных участков коренных пород вниз по склону под влиянием силы тяжести, хорошо дешифрируются на склонах долин и отдельных возвышенностей. К таким образованиям относятся оплывины, оползни, обвалы, а также широко распространенные в горах каменные осыпи и россыпи.

Обвалы и осыпи образуются в процессе отрыва от основной массы горной породы крупных глыб и последующего их перемещения вниз по склону с аккумуляцией в конусах выноса. Крутые обвально-осыпные склоны хорошо дешифрируются по степени освещенности и затененности, в зависимости от их экспозиции. В синтезе естественных цветов такие склоны обычно имеют различные оттенки серого цвета, указывающие на отсутствие растительного покрова (рис. 3.1.1).

Двигаясь по склону, продукты выветривания оказывают механическое воздействие на поверхность и вырабатывают в ней желоба или осыпные лотки, которые дешифрируются по степени освещенности (рис. 3.1.2). Обвалы также имеют ниши и борозды от верхней кромки отрыва по направлению вниз. Накопленный материал обрушения (конусы выноса) скапливается у подножий. Такие участки, расположенные под крутыми обвально-осыпными склонами также хорошо выделяются на снимках по отсутствию растительности. Осыпи выделяются в виде «языков» серого цвета, спускающихся в ниже расположенные высотные пояса: горно-луговой и горно-лесной (рис. 3.1.2). На снимках в синтезе SWIR-NIR-RED все каменистые поверхности имеют ярко-розовый оттенок.

Оползни образуются как в горах (в областях развития слабосцементированных пород), так и на равнинах, где они приурочены к берегам рек и водоемов. Возникают оползни на крутых склонах (от 15°). В большинстве случаев площади оползневых участков в равнинных районах недостаточны, чтобы надежно распознать их по снимкам среднего разрешения, и требуется привлечение снимков сверхвысокого разрешения.

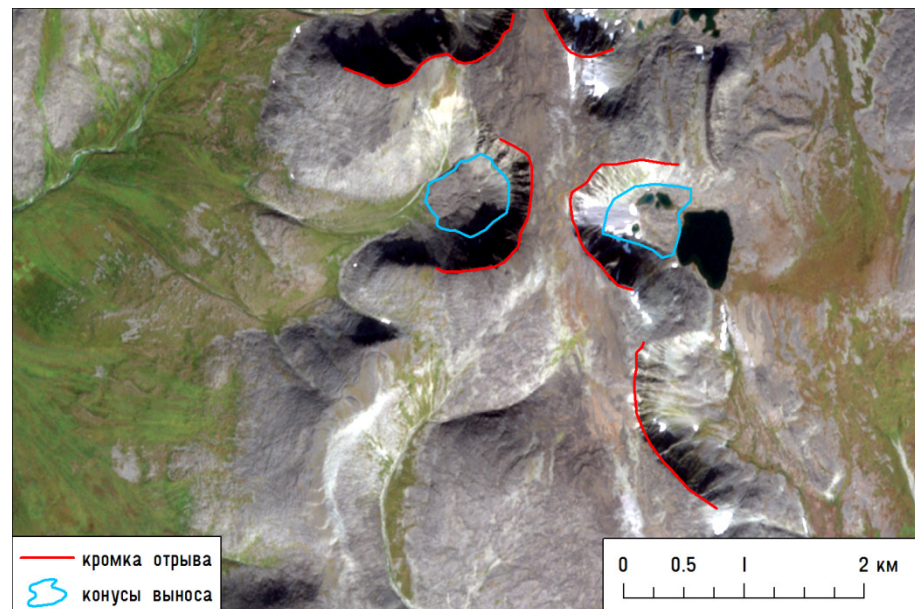


Рис. 3.1.1. Обвальнo-осыпные склоны на Приполярном Урале. Снимок Sentinel-2, синтез естественных цветов

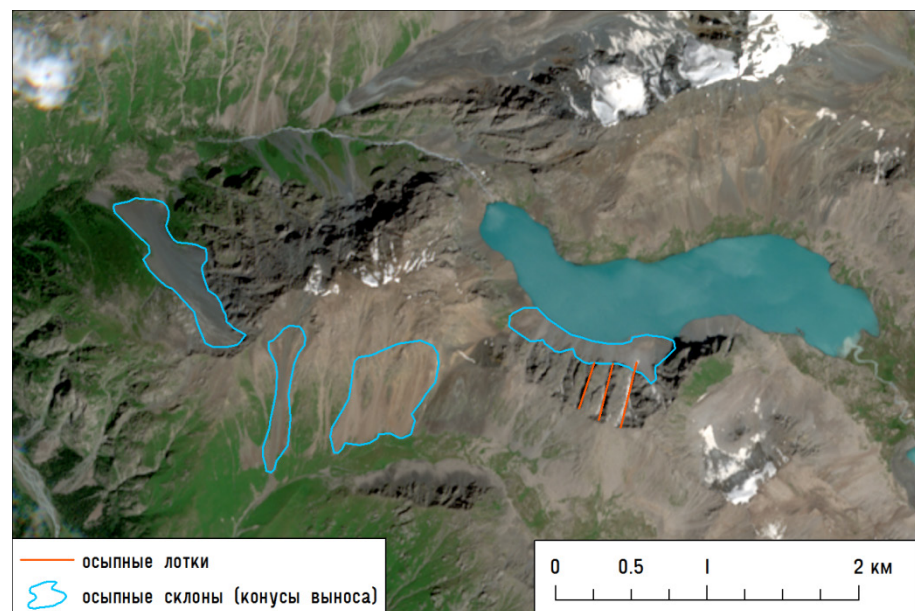


Рис. 3.1.2. Обвальнo-осыпные склоны в Центральном Тянь-Шане. Снимок Sentinel-2, синтез естественных цветов

Оползневые формы дешифрируются по обнажению коренных пород на стенке срыва, которое хорошо контрастирует на фоне растительности (рис. 3.1.3). При этом язык оползня может выходить за пределы подошвы склона. Иногда на теле оползня можно заметить явление «пьяного леса» в виде завала (наклона) съехавших с оползнем деревьев. Однако этот признак можно выявить только по снимкам сверхвысокого разрешения.



Рис. 3.1.3. Оползень на берегу Чусовского залива Камского водохранилища на снимках: а) Sentinel-2, пространственное разрешение 10 м и б) WorldView-2 (0,5 м), в синтезе естественных цветов. Красной линией показана стенка отрыва оползня

Ледниковые формы рельефа

Наиболее распространенными формами рельефа ледникового происхождения являются морены, кары и цирки, троговые долины. Они распространены в большинстве районов мира с развитым горным оледенением.

Кар представляет собой котловину в горах в виде амфитеатра, замыкающую верхний конец ледниковой долины. Под ледниковым цирком понимают совокупность нескольких каров. Внутри каров и цирков могут находиться ледники, истоки долинных ледников, также они могут быть заняты озерами ледникового происхождения. Кары хорошо дешифрируются главным образом по степени освещенности или затененности склонов и по расположенным в них ледникам и снежникам, имеющим ярко-голубой цвет в комбинации каналов SWIR-NIR-RED (рис. 3.1.4).

Троговые долины широко распространены в областях развития современного или древнего горного оледенения. Они отличаются корытообразным (U-образным) поперечным профилем, широким дном и крутыми вогнутыми бортами, которые связаны с ледниковой экзарацией (выпахивающей деятельностью ледника).

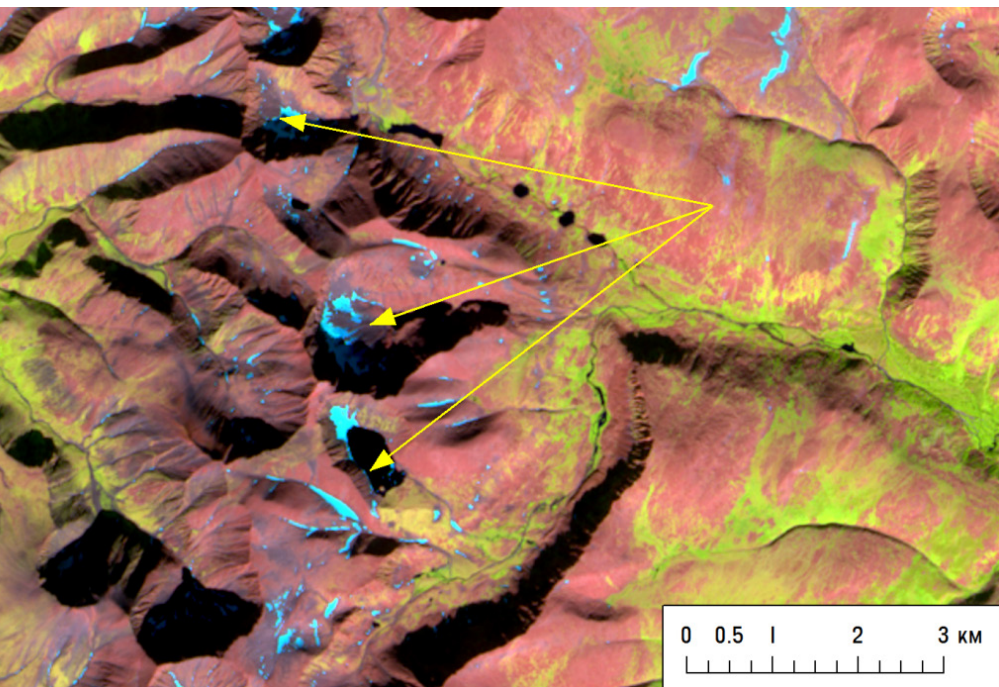


Рис. 3.1.4. Кары с ледниками на Приполярном Урале. Снимок Sentinel-2 в комбинации каналов SWIR-NIR-RED

В горных системах с развитым современным оледенением у истоков троговых долин находятся ледники и их морены (рис. 3.1.5). Более подробно дешифрирование ледников рассмотрено в разделе 3.3. Важной отличительной чертой троговых долин являются висячие долины-притоки. Их днище лежит выше, нередко на 150—200 м и более, чем дно основной троговой долины, и отделяется от него устьевой ступенью. Это объясняется тем, что ледник, заполнявший основную долину, врезался заметно сильнее, чем его более мелкий приток [6].

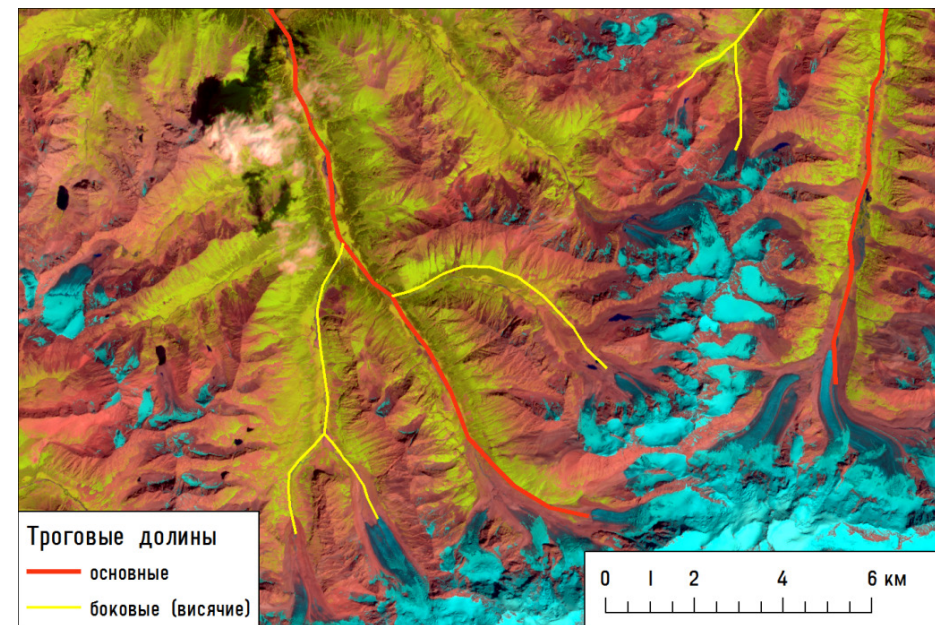


Рис. 3.1.5. Основные и боковые троговые долины (Центральный Тянь-Шань). Снимок Sentinel-2 в синтезе SWIR-NIR-RED

Линейные эрозионные формы рельефа (овраги и балки)

Овраги и балки получили широкое распространение в лесостепных и степных агроландшафтах равнин умеренного пояса. Одним из своеобразных «полюсов эрозии» считается восток Русской равнины. Основным дешифровочным признаком овражно-балочной сети является развитая древовидная структура и, соответственно, формируемый ей древовидный рисунок изображения (рис. 3.1.6).

К дешифровочным признакам активно растущих оврагов относятся характерная узколинейная плановая форма с четкими, геометрически хорошо выраженными границами. Наличие четкой бровки и четкой линии тальвега, а также незадернованных участков склонов (откосов) косвенно свидетельствуют о V-образном профиле активно растущего оврага. Поскольку незадернованные склоны хорошо выделяются на фоне растительности по снимкам практически в любой комбинации каналов, этот признак является основным при дешифрировании растущих оврагов по снимкам среднего разрешения. В синтезе «красных цветов» эти участки имеют ярко-голубой цвет (рис. 3.1.7).

Балки, в отличие от оврагов, имеют достаточно сформированный почвенно-растительный покров на выположенных склонах широко выработанного U-образного профиля. Контуры балок хорошо подчеркиваются конфигурацией окружающих их полей (особенно если они распаханы), и нередко также контурами байрачных лесов на их склонах.

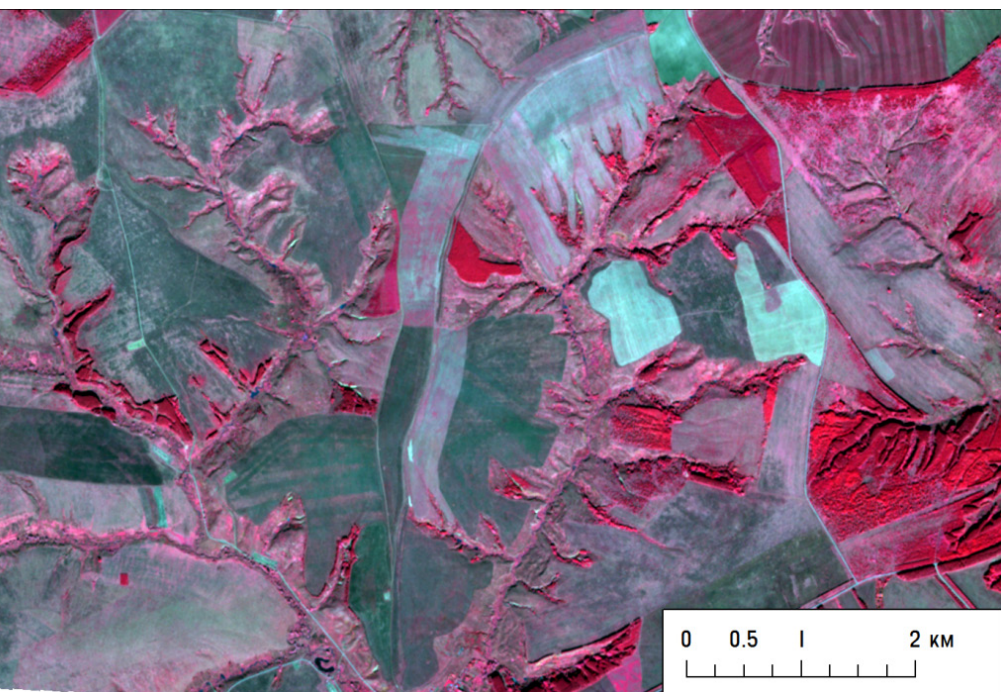


Рис. 3.1.6. Древоподобный рисунок овражно-балочной сети (восточный Татарстан) на снимке Sentinel-2 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN

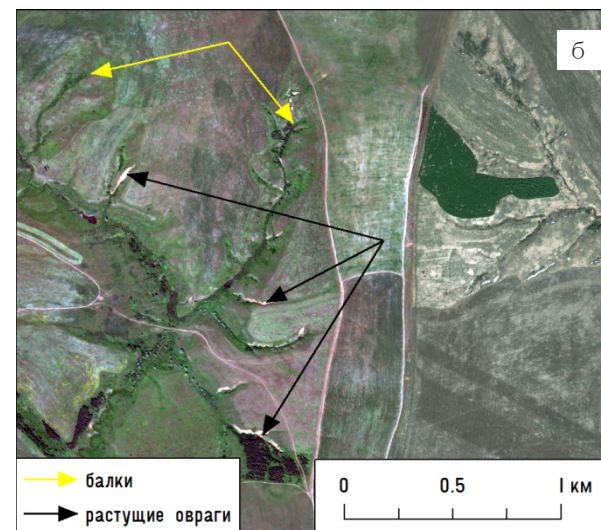
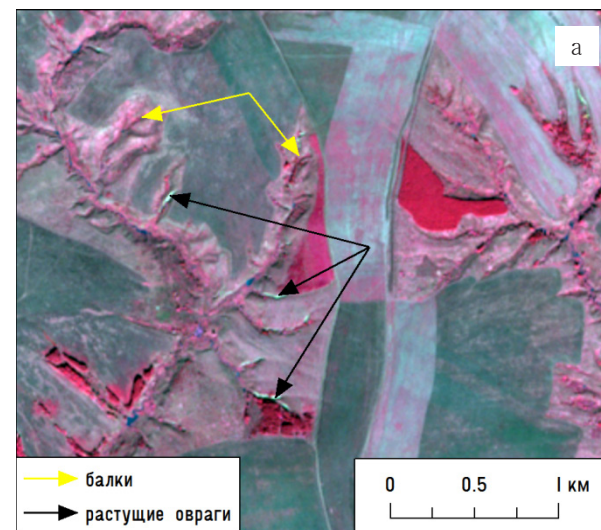


Рис. 3.1.7. Балки и активно растущие овраги на снимке Sentinel-2 в комбинации каналов NIR-RED-GREEN (а) и на снимке сверхвысокого разрешения в естественных цветах (б)

Для изучения овражно-балочной сети очень информативны зимние снимки. Благодаря низкому углу освещения Солнцем и длинным теням на таких снимках создается эффект трехмерного отображения рельефа, который позволяет выделить практически все формы эрозионного рельефа даже по снимкам среднего пространственного разрешения. При этом нет существенной зависимости от выбора спектрального синтеза. Различить овраги и балки по таким снимкам можно на основе крутизны склонов и типа профиля, который хорошо просматривается благодаря освещенности или затененности склонов, а также по наличию или отсут-

ствию древесной растительности на склонах. Эрозионные формы с крутыми обрывистыми склонами и лишенные растительности с большей вероятностью являются активными оврагами.

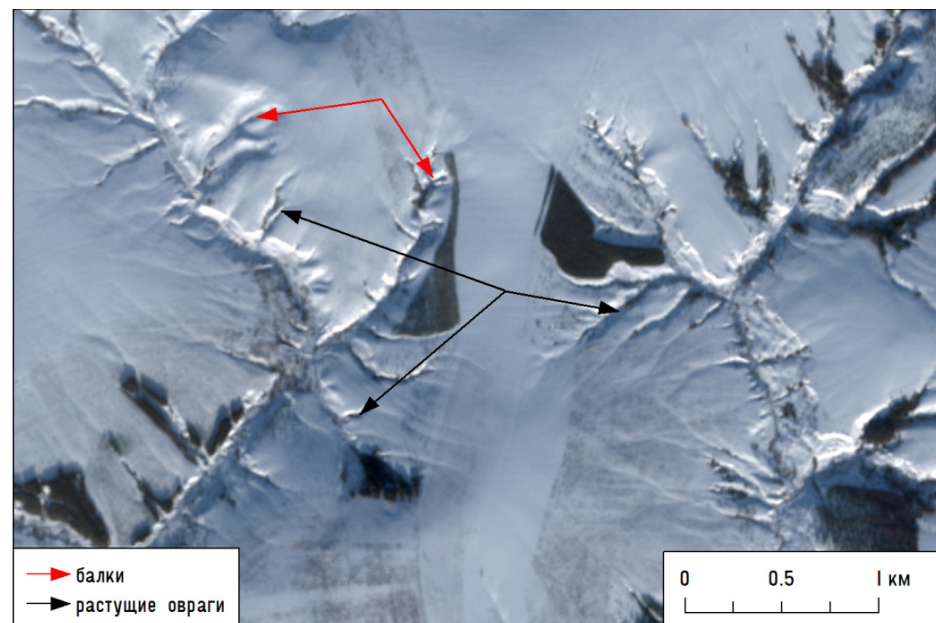


Рис. 3.1.8. Овражно-балочный рельеф восточного Татарстана на зимнем снимке Sentinel-2 в синтезе естественных цветов

Флювиальный рельеф

Речные долины имеют характерные дешифровочные признаки, как в безлесных, так и в залесенных районах. В безлесных районах речные долины хорошо видны на снимках благодаря интразональной пойменной растительности (луговой или болотной, а в аридных зонах – также по орошаемым землям). Интразональные растительные сообщества хорошо выделяются на синтезированных снимках с использованием ИК каналов, что связано с различными условиями увлажнения речных пойм и прилегающих территорий (рис. 3.1.9). Для залесенных горных районов характерно изображение светлой сети речных долин с галечниковыми поймами на темном фоне лесной растительности (в синтезе естественных цветов). При значительной расчлененности рельефа и низком угле стояния Солнца речные долины дешифрируются непосредственно (рис. 3.1.10).

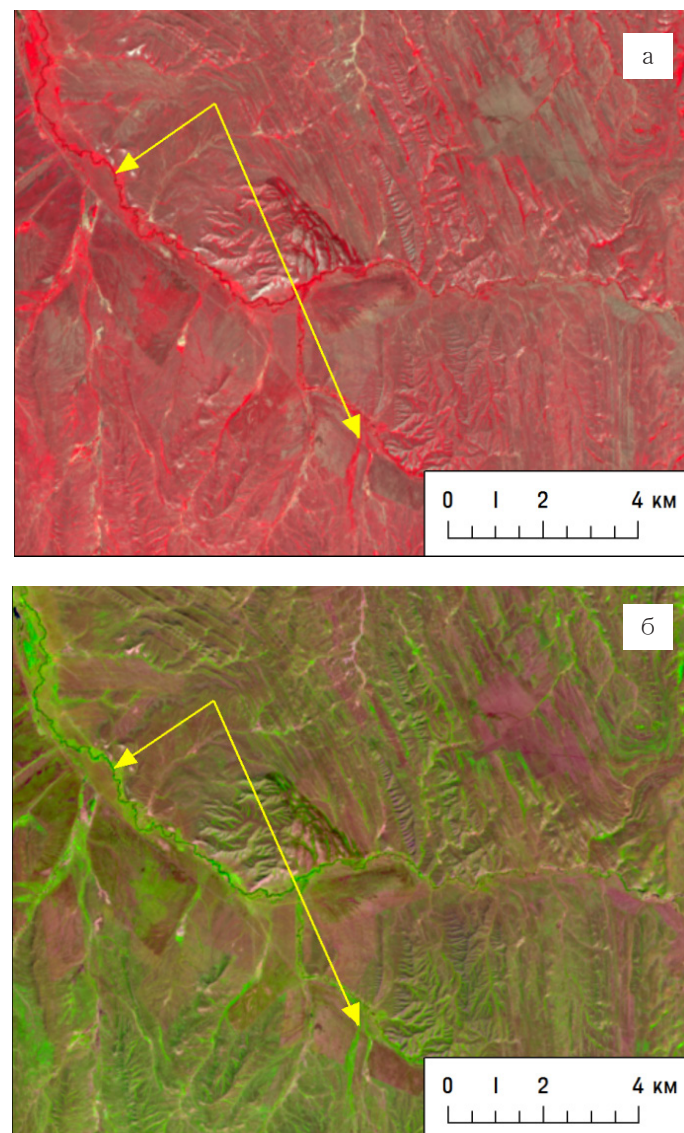


Рис. 3.1.9. Дешифрирование речных долин по наличию интразональной растительности в поймах. Снимок Sentinel-2 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

В равнинных районах на снимках хорошо отображается пойменный рельеф: гривы, старичные понижения, следы меандрирования разного возраста. Их позволяют выделить в том числе и косвенные дешифровочные признаки, основанные на растительности. Так, вокруг пойменных озер преобладают мелколиственные деревья (ива, ольха), а заросшие старичные озера трансформируются в низинные болота (рис. 3.1.11).

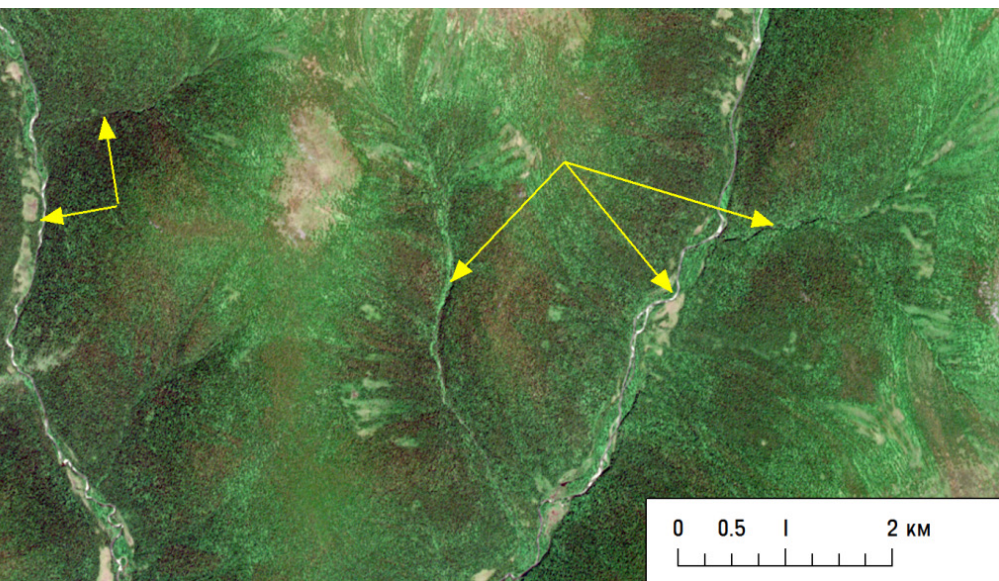


Рис. 3.1.10. Долины водотоков разного порядка в горном районе. Снимок Sentinel-2 в естественных цветах

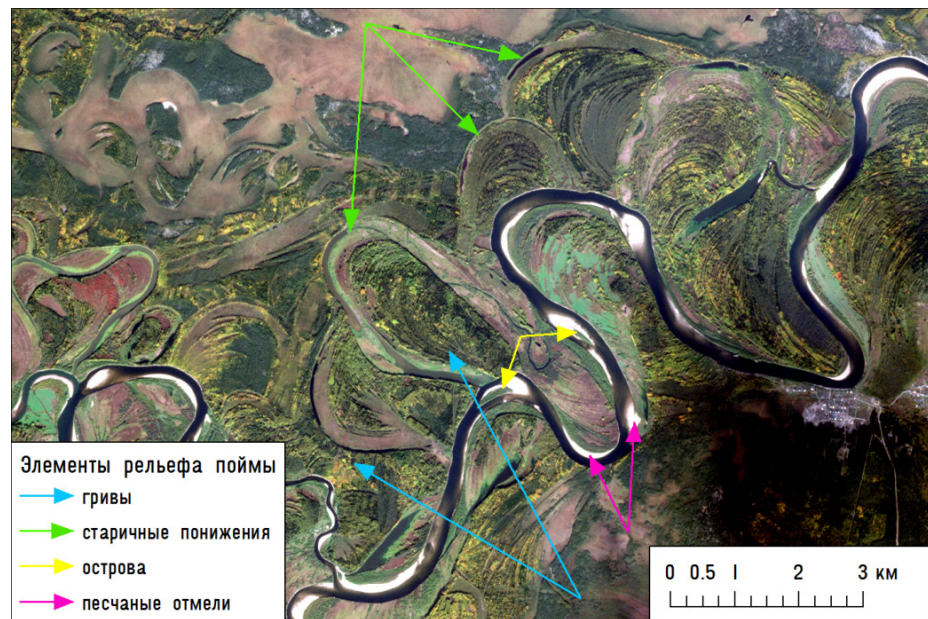


Рис. 3.1.11. Элементы рельефа широкой поймы равнинной реки (р. Вишеры в нижнем течении) на снимке Sentinel-2 в естественных цветах

Также разновременные космические снимки весьма информативны для изучения русловых процессов, в том числе динамики речных дельт [13]. Более подробно этот вопрос рассмотрен в Атласе [16]. Примеры снимков речных дельт и других типов устьев рек (эстуариев) приведены в разделе 3.4 настоящего пособия.

Карстовые формы рельефа (воронки)

В районах, сложенных карстующимися породами (сульфатными и карбонатными) образуются различной формы и размера карстовые воронки и впадины. Дешифрируются такие формы достаточно легко на открытых участках по многочисленному скоплению образований округлой (овальной) формы (рис. 3.1.12, а). Прямыми дешифровочными признаками выступают размер, овальная форма, наличие ареала древесно-кустарниковой и травяной растительности вокруг овальной формы, или наличие водного зеркала округлой формы (для карстовых озер). Площадь воронок обычно сравнительно небольшая, поэтому по снимкам среднего разрешения можно выявить только их наличие (рис. 3.1.12, а), а для более детальных оценок требуются снимки сверхвысокого разрешения (рис. 3.1.12, б).

По высокодетальным снимкам можно судить не только о густоте, форме, абсолютным и относительным размерам этих форм, но и об активности карстовых процессов. Большие размеры вместе с залесенностью указывают на слабое течение процесса. Наоборот меньшие размеры, четкие границы, отсутствие растительного покрова и задернованности являются индикаторами активно развивающейся формы (рис. 3.1.12, б).

Косвенными дешифровочными признаками карстовых воронок и западин, особенно небольшого размера, а также находящихся на лесопокрытых участках, служит наличие участков нарастающего снега поздней весной и даже в начале лета. Такие участки имеют форму белого полумесяца или овала, приуроченного к затененному склону северной экспозиции (рис. 3.1.12, б).

Часто воронки являются местом складирования бытового и сельскохозяйственного мусора, что видно по нарушению четкости (размытости) границы контура воронки. Как правило, к этому месту ведет полевая дорога, тон изображения такой воронки яркий ввиду высокого альбедо из-за постоянного отсутствия растительности в этой части.

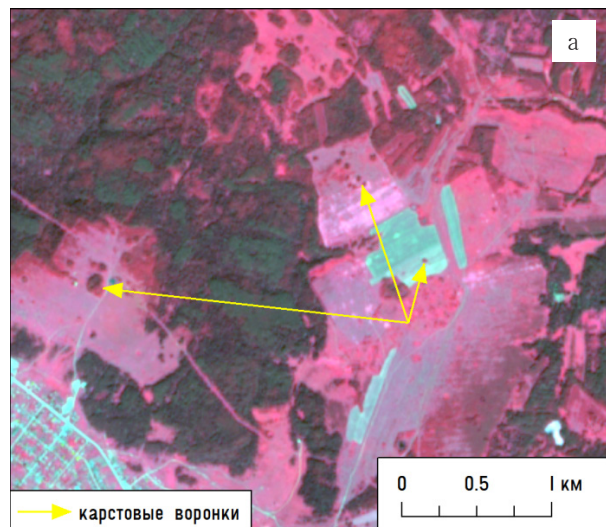


Рис. 3.1.12. Карстовые формы рельефа на снимке Sentinel-2 в синтезе NIR-RED-GREEN (а) и на снимке сверхвысокого разрешения с сервиса ESRI Imagery (в естественных цветах).

Цифрами обозначены:

- 1 - небольшие воронки, выделяющиеся по наличию снежного покрова,
- 2 - карстовое озеро,
- 3 - крупная старая воронка,
- 4 - активная молодая воронка (возможно провал)

Термокарстовые формы рельефа

Термокарстовые процессы распространены на значительной части территории России, которая находится в зоне многолетней мерзлоты. Они наиболее характерны для севера Западно-Сибирской равнины, а также для Северо-Востока России.

Мерзотно-термокарстовый рельеф характеризуется массовым развитием термокарстовых озерных котловин и образующихся по мере зарастания озер аласов (рис. 3.1.13). Отличительным признаком термокарстовых озер является их квазиокруглая или овальная форма. Хорошее отображение озер и аласов на космических снимках позволяет не только четко выделить районы распространения термокарстового рельефа, но и изучать стадии его развития. Выделяются молодые формы – озерные термокарстовые котловины (полностью заполненные водой), зрелые – термокарстовые озера с каймой окружающих их аласов и старые – сухие аласы с остаточными озерами или без них [13]. В самих аласах преобладает луговая растительность, а цвет их отображения на снимке зависит от стадии вегетации. Границы аласов хорошо видны благодаря изменениям растительного покрова.

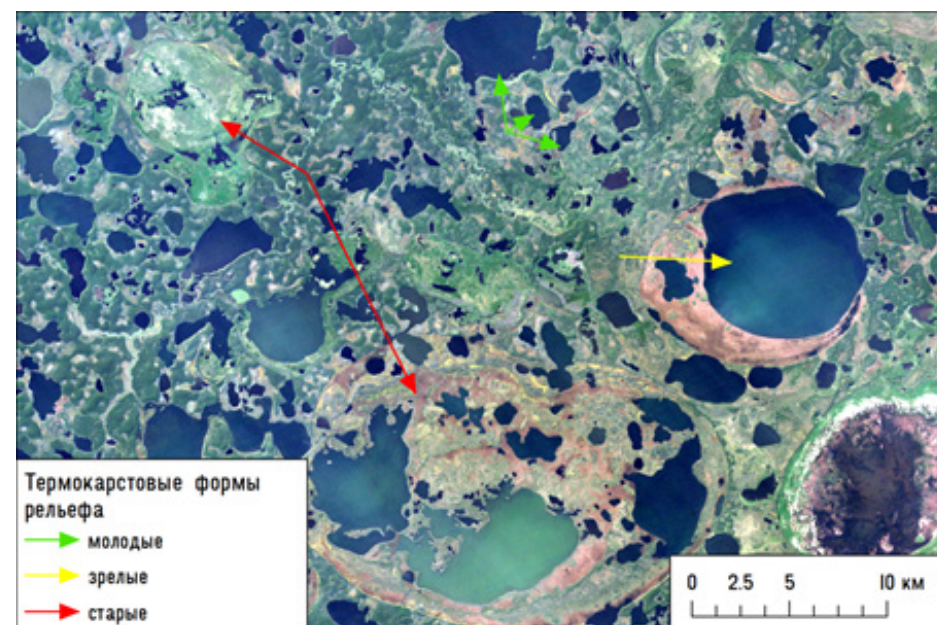


Рис. 3.1.13. Мерзотно-термокарстовый рельеф (Колымская низменность) на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе каналов «естественные цвета»

Гривно-ложбинный рельеф

Отличительной особенностью суглинистых равнин (характерной, например, для междуречья Тобола и Ишима в Западной Сибири), является гривно-ложбинный рельеф. Он представлен линейно вытянутыми гривами, в местной топонимике именуемыми увалами, длиной 1-9 км, шириной до нескольких сотен метров, высотой до 10-12 м. Гривы разделены озерными котловинами и суффозионными просадками. Котловины и просадки часто заняты солонцами и солончаками, малопригодными для сельскохозяйственной обработки.

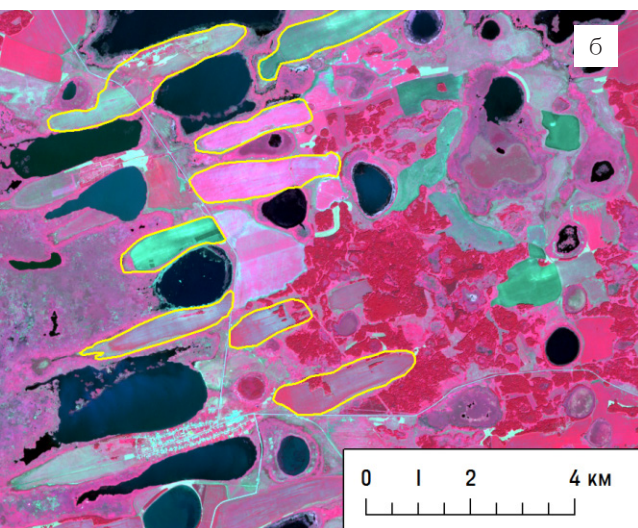
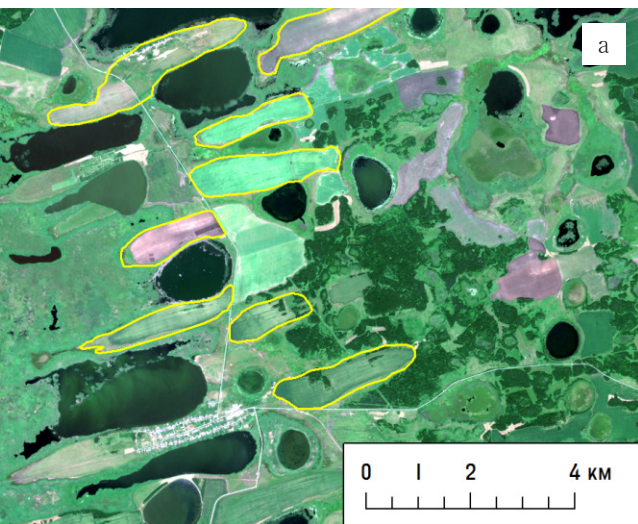


Рис. 3.1.14. Гривно-ложбинный рельеф в междуречье Тобола и Ишима на снимке Sentinel-2 летнего сезона: в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе NIR-RED-GREEN (б). Гривы выделены желтыми контурами

Прямым дешифровочным признаком грив являются вытянутая форма, практически одинаковая ориентация в пространстве, размеры. Гривы отличаются хорошим дренажом и в основном распаханы. Границы пашни и пастбищных (сенокосных) угодий полностью подчеркивают их форму и местонахождение, что одновременно является своеобразным косвенным признаком выделения подобных форм рельефа (рис. 3.1.14).

Западинно-просадочный рельеф

Западинно-просадочные формы рельефа образуются в процессе выноса водами мельчайших частиц породы и растворенных веществ, что приводит к просадке поверхности. Одной из распространенных форм западинно-просадочного рельефа являются «степные блюдца», характерные для степных бессточных участков равнин (в частности, для южной части Западно-Сибирской равнины).

Суффозионные просадки дешифрируются достаточно легко по многочисленному скоплению образований округлой (овальной) формы. Часть из них заполнена водой и хорошо дешифрируется в комбинациях каналов с использованием ближнего и среднего ИК спектра (рис. 3.1.15). Другие отличаются разной степенью зарастания водного зеркала (вплоть до 100 %).

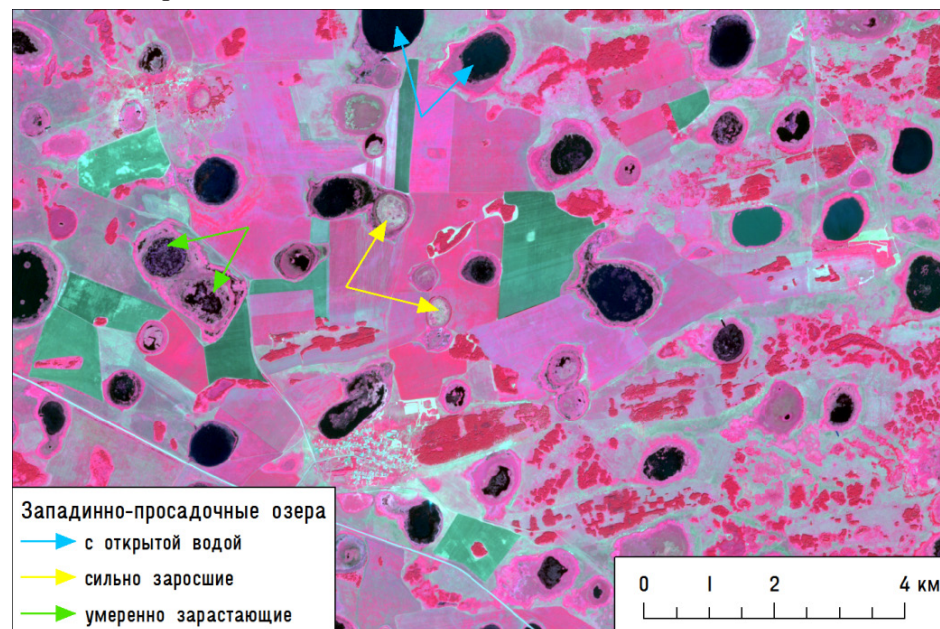


Рис. 3.1.15 Суффозионно-просадочные озера (степные блюдца) в Курганской области Снимок Sentinel-2 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN

Степень зарастания можно определить как процентное соотношение площади зеркала открытой воды к площади контура периметра самого блюдца. В синтезе естественных цветов сильно заросшие просадки выделить сложнее, чем в синтезе с использованием ИК каналов.

Часто зарастание озер бывает вызвано эвтрофикацией, которая наблюдается вблизи населенных пунктов и обуславливается стоком биогенных элементов с животноводческих ферм и летних стоянок скота. Неравномерность зарастания со стороны населенного пункта или ферм является наглядным подтверждением данного процесса.

Оценить понижение дна суффозионной просадки можно косвенным методом по тону зеркала воды, обычно оно не превышает 2-3 м, редко до 7 м. Чем больше просадка, тем глубже водоем и темнее тон водной поверхности.

Бэровские бугры

Бэровские бугры – это продолговатые холмы, описанные в 1866 году Карлом Бэром, распространены на большей части Прикаспийской низменности, в пределах Астраханской области и Калмыкии. Бугры имеют очень правильную и схожую форму, направлены с востока на запад. Высота бугров колеблется от 10 до 45 м, длина может достигать 25 км, а ширина, как правило, составляет 200–300 м. Восточные склоны бугров крутые, а западные – пологие.

Прямые дешифровочные признаки бугров почти полностью схожи с грядовым рельефом юга Западной Сибири, за исключением их протяженности и высоты. Косвенные признаки определяются характером растительного покрова. Ввиду того, что бэровские бугры являются центрами скопления солей, своего рода их аккумуляторами, то растительность их довольно скудная и представлена в основном галофитами. Пространство между буграми может быть занято пресными или солеными озерами (рис. 3.1.16, а). Растительный покров наиболее развит по берегам озер, эти участки выделяются в вариантах синтеза с использованием ИК каналов спектра (рис. 3.1.16, б).

Соляные купола

Еще одной интересной формой рельефа, распространенной в Прикаспийской низменности, являются соляные купола. Соляным куполом (или соляной антиклиналью) называют куполовидную или антиклинальную складку, ядром которой является соляной массив. Соляные пласты, перекрытые более плотными породами, под сильным давлением способны к пластичному течению вверх.

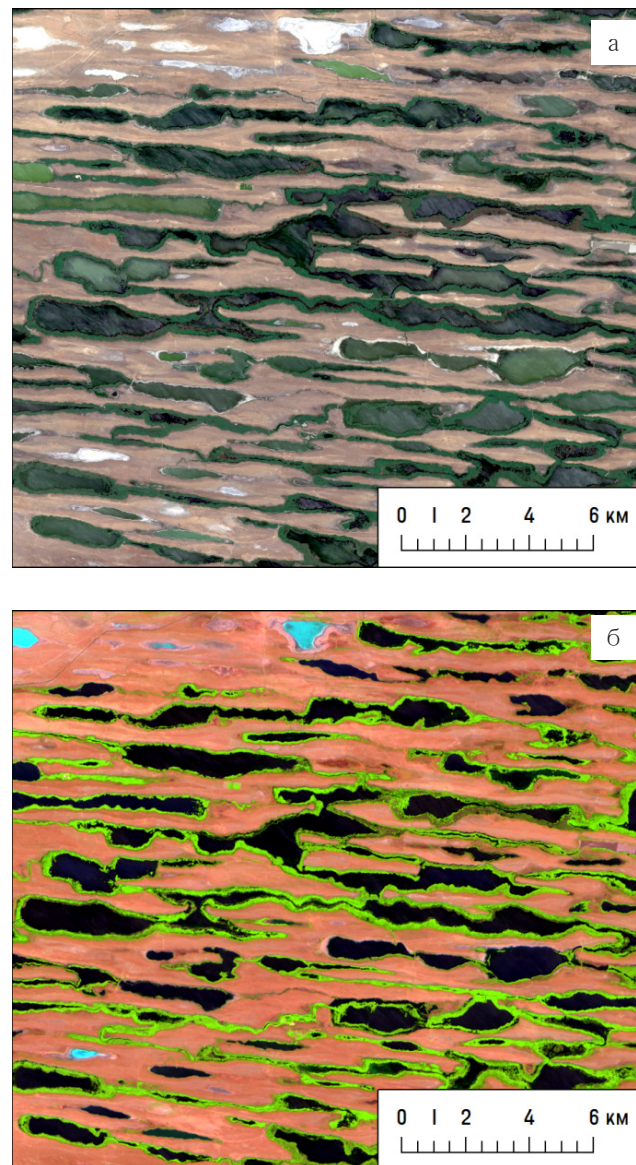


Рис. 3.1.16. Бэровские бугры на снимке Sentinel-2 летнего сезона: в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б) Растительный покров по берегам озер выделяется ярко-зеленым цветом

Поднимаясь, они деформируют окружающие толщи, образуя своего рода складчатые высокие поднятия. Дешифрируются такие формы по освещенности и затененности склонов (как и другие положительные формы рельефа). Характерной особенностью является отсутствие какой-либо растительности вблизи вершины и на гребне (из-за высокого содержания солей в почве или вообще отсутствия почвенного покрова).

Участки, покрытые растительностью, встречаются в понижениях вокруг такого купола и хорошо выделяются (ярко-красными полосами) на синтезированных снимках с использованием ИК каналов (рис. 3.1.17, б).

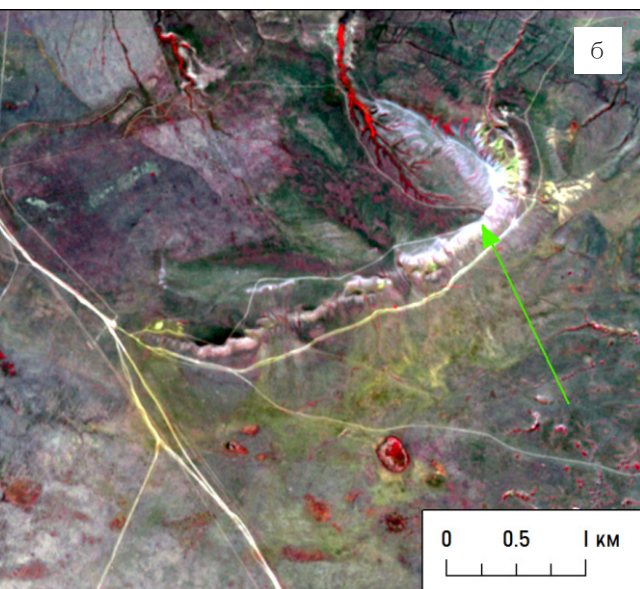
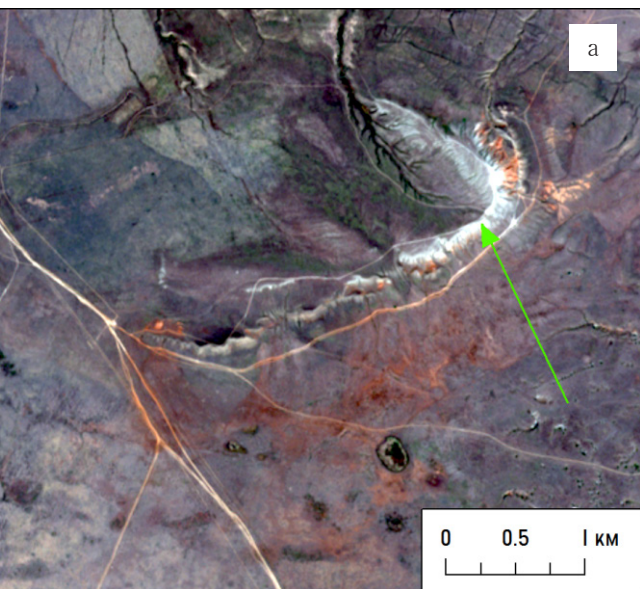


Рис. 3.1.17. Соляной купол на снимке Sentinel-2 летнего сезона: в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе NIR-RED-GREEN (б)

3.2. Почвенный покров

Изучение и картографирование почвенного покрова на основе данных космической съемки является актуальным и практически значимым направлением, прежде всего для сельского хозяйства. Однако определение отдельных характеристик почвенного покрова и тем более типа почв (согласно генетической классификации) по данным дистанционного зондирования часто представляет собой сложную и нетривиальную задачу. Ее решение требует высокой квалификации специалиста, а также хороших знаний особенностей исследуемой территории [15].

Сложность дешифрирования почвенного покрова определяется двумя факторами. Во-первых, почва как целостный природный объект, имеющий определенное строение генетического профиля и различные почвенные горизонты, на космических снимках непосредственно не изображается. Даже в случае распахки и отсутствия посевов на снимках отображаются лишь отдельные свойства поверхностного горизонта – гумусированность, влажность, карбонатность, засоленность, механический состав. В большинстве случаев дешифрирование производится на основе косвенных признаков – взаимосвязей почвы с компонентами ландшафта, получающими наилучшее отображение на космических снимках, в первую очередь с растительностью и рельефом [15].

Вторая проблема, часто возникающая при дешифрировании почвенного покрова, заключается в том, что спектральные характеристики открытой почвы определяются с одной стороны содержанием органического вещества (гумуса), а с другой – влажностью. Увеличение содержания гумуса или рост влажности почвы приводят к снижению коэффициентов спектральной яркости (прежде всего в красной зоне, ключевой для дешифрирования характеристик почвенного покрова). Разделить влияние этих двух составляющих (содержания гумуса и влажности) часто весьма проблематично.

Для дешифрирования характеристик почвенного покрова большое значение имеет также выбор сезона съемки. Наиболее информативными являются весенние и осенние снимки, когда значительные площади сельхозугодий распаханы и не покрыты растительностью, что позволяет использовать прямые дешифровочные признаки. В летний период площадь открытых почв существенно меньше. Также возможность использования прямых дешифровочных признаков зависит от площади обрабатываемых сельскохозяйственных угодий. Наиболее информативны прямые признаки для дешифрирования почв степной и лесостепной зон, в пределах которых распахано до 70-80% территории.

Общие особенности спектральных характеристик почвенного покрова

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. Наиболее детальное русскоязычное описание областей применения данного индекса можно найти в статье [10].

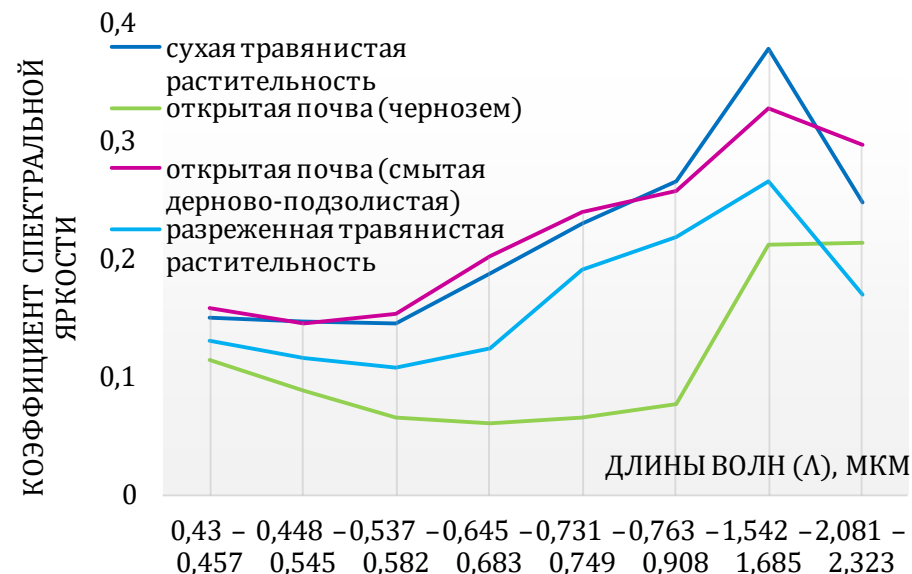
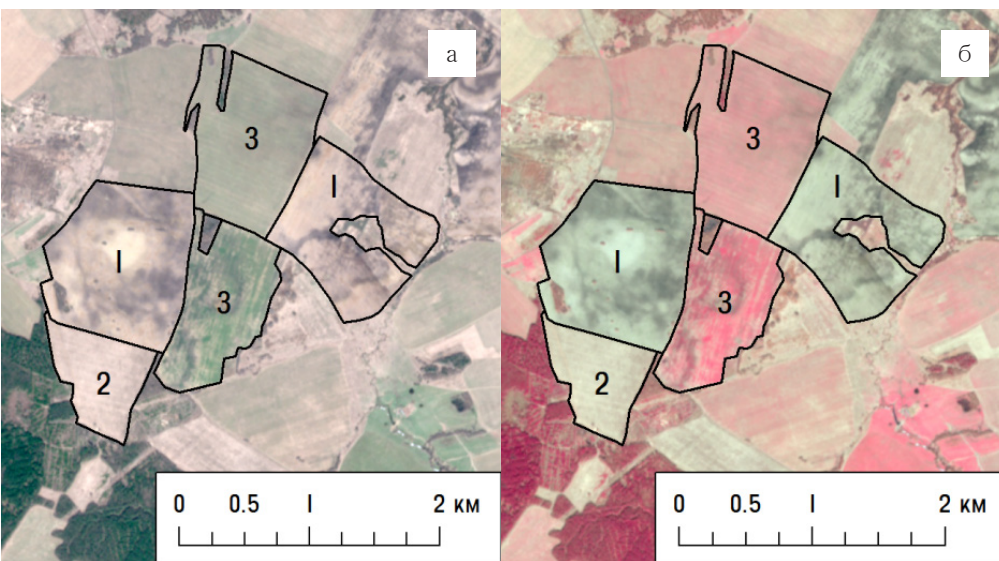


Рис. 3.2.1. Кривые коэффициентов спектральной яркости открытых почв, сухой растительности и разреженной травянистой растительности (по снимку Sentinel-2)

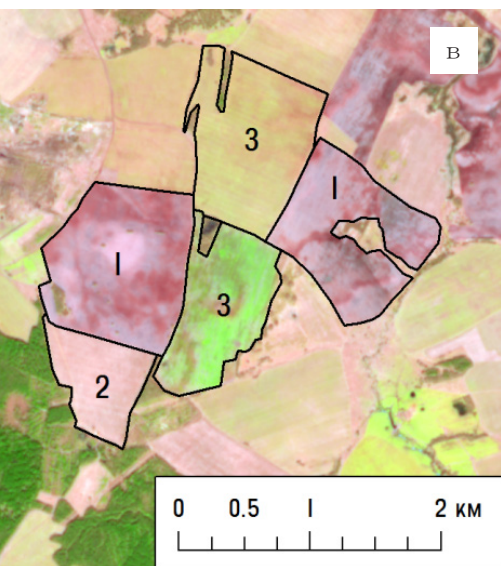
Для выделения по снимкам участков с открытыми почвами оптимально использовать синтез каналов «красные цвета» (NIR-RED-GREEN), а также SWIR-NIR-RED. Синтез естественных цветов малопригоден для отделения открытой почвы и сухой растительности (рис 3.2.2, а). В синтезе красных цветов открытые почвы отображаются различными оттенками от светло-голубого (характерного для открытой песчаной поверхности или смытой почвы) до почти черного для черноземов (рис. 3.2.2, 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. 3.2.2, в). Общей особенностью открытых почв в этом синтезе является значительное превышение яркости в средней ИК зоне спектра над яркостью в ближней ИК зоне.



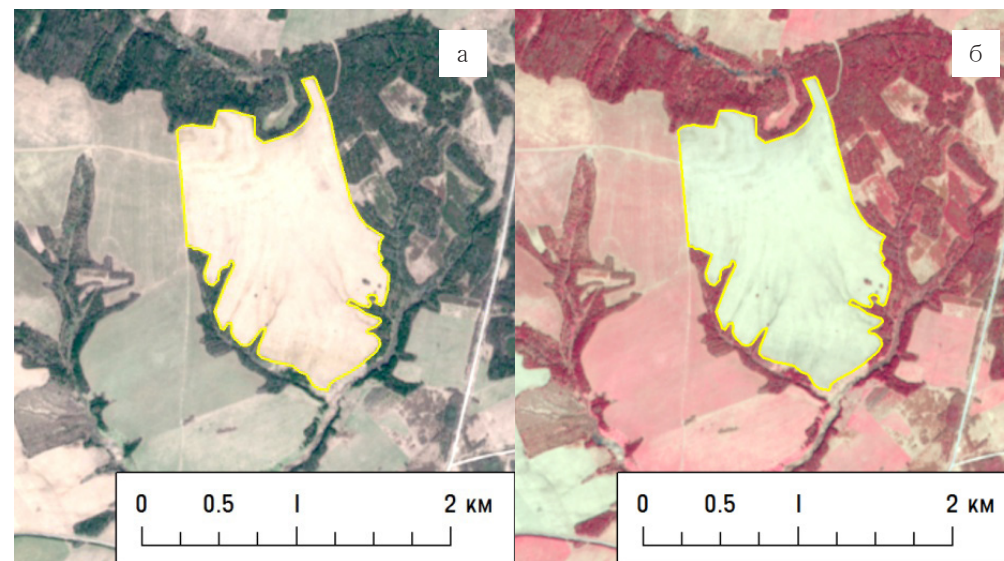
«естественные цвета»

NIR-RED-GREEN



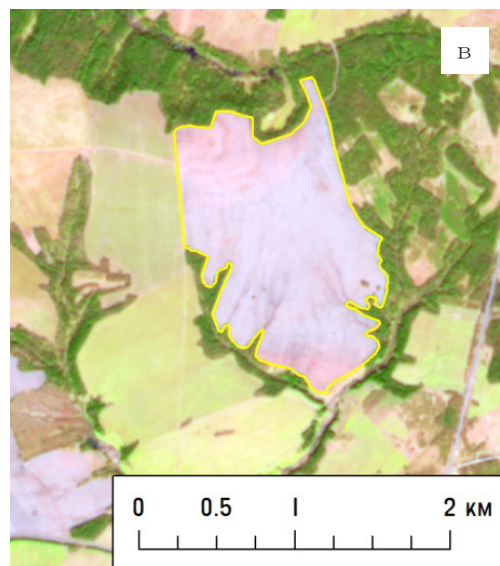
SWIR-NIR-RED

Рис. 3.2.2. Открытая почва на пашне (1), сухая растительность (2) и посевы сельскохозяйственных культур (3) на весеннем снимке Sentinel-2 в трех вариантах цветового синтеза



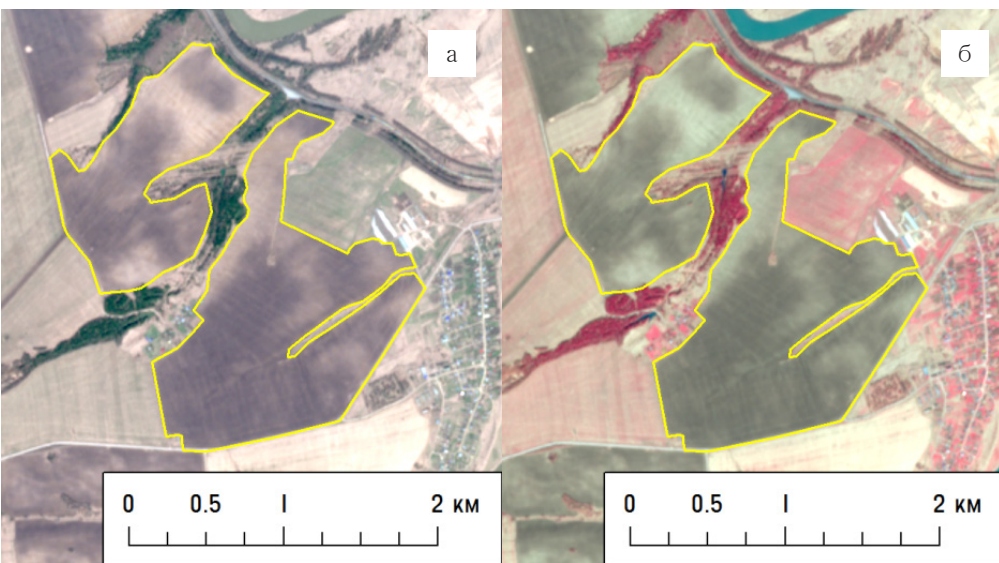
«естественные цвета»

NIR-RED-GREEN



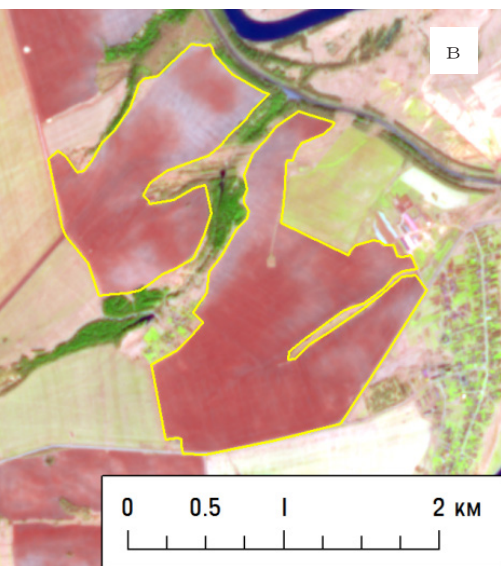
SWIR-NIR-RED

Рис. 3.2.3. Распаханные сельхозугодья на дерново-сильнопodzolistых почвах на весеннем снимке Sentinel-2 в трех вариантах цветового синтеза



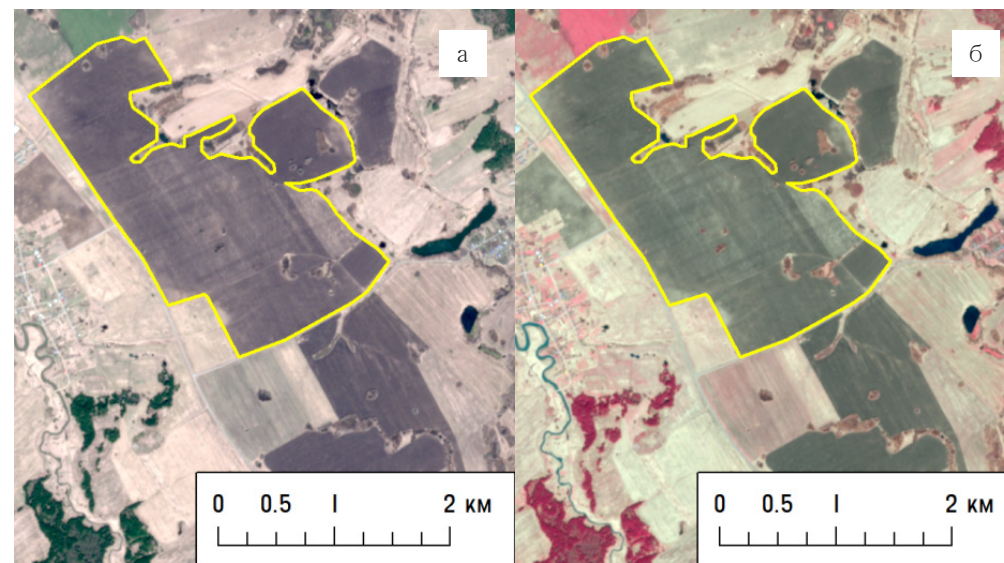
«естественные цвета»

NIR-RED-GREEN



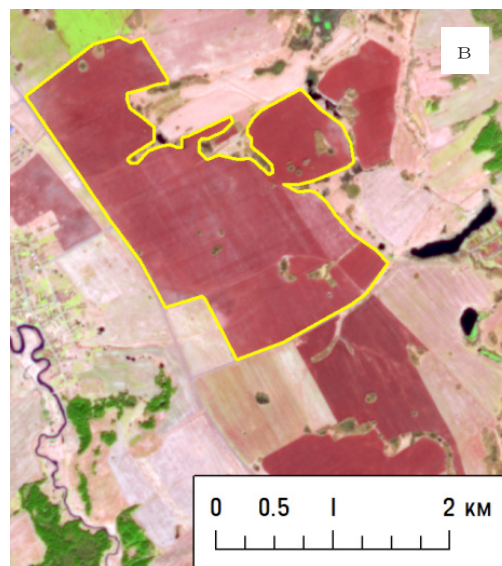
SWIR-NIR-RED

Рис. 3.2.4. Распаханные
сельхозугодья на
серых лесных почвах
на весеннем снимке
Sentinel-2 в трех
вариантах цветового
синтеза



«естественные цвета»

NIR-RED-GREEN



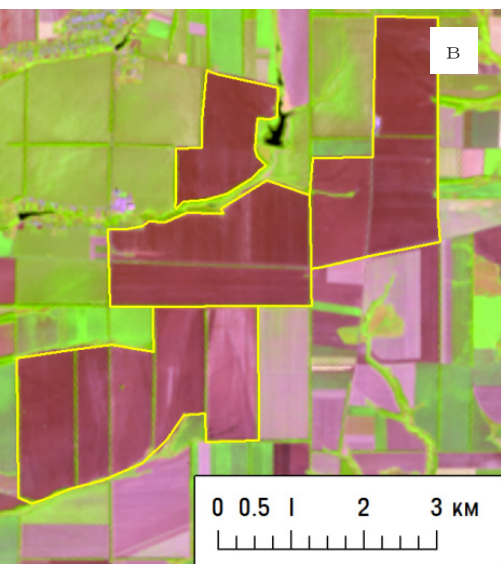
SWIR-NIR-RED

Рис. 3.2.5. Распаханные
сельхозугодья
на черноземах
выщелоченных на
весеннем снимке
Sentinel-2 в трех
вариантах цветового
синтеза



«естественные цвета»

NIR-RED-GREEN



SWIR-NIR-RED

Рис. 3.2.6. Распаханные сельхозугодья на черноземах обыкновенных на летнем снимке Sentinel-2 в трех вариантах цветового синтеза

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.

Спектральные характеристики различных типов почв

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 равных условиях, песчаные почвы имеют существенно более высокую яркость, чем глинистые [15]. 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 ИК 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. Примеры изображения на снимках черноземов, серых лесных почв и дерново-подзолистых почв в наиболее часто используемых вариантах цветового синтеза приведены на рис. 3.2.3 – 3.2.6. Именно на этих типах почв расположена большая часть площади пашины в России.

В большинстве случаев смена зональных типов почв по снимкам прослеживается плохо, поскольку зональные границы являются нечеткими, с наличием широких переходных зон [13]. 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 [20].

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. 3.2.7).

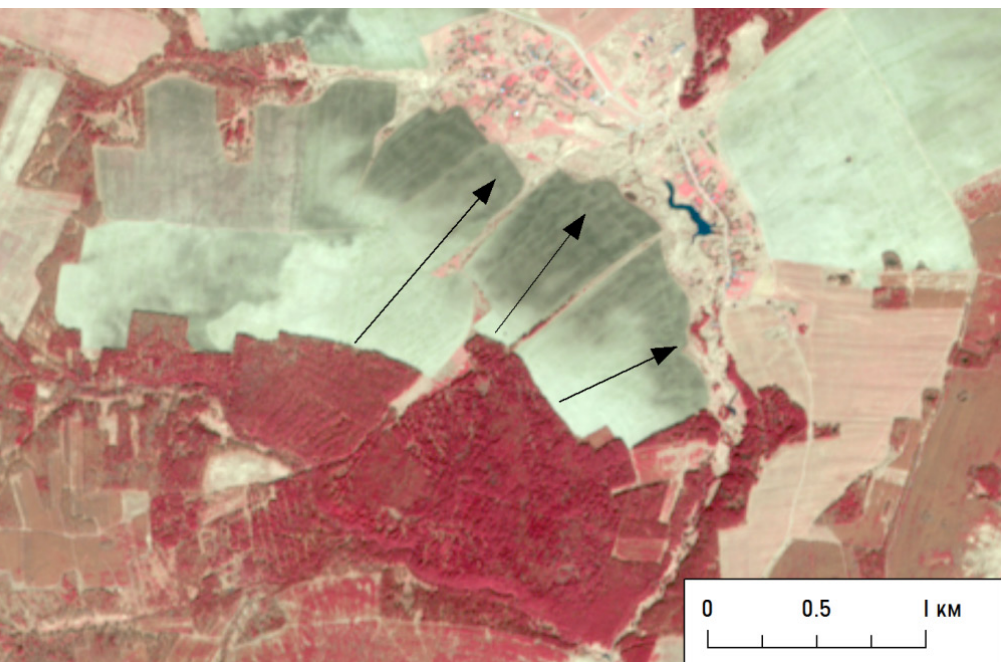


Рис. 3.2.7. Локальные вариации почвенного покрова, обусловленные рельефом. Снимок Sentinel-2 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN. Стрелками показано направление течения воды по склону и смыва почвенных частиц

Из интразональных типов почв лучше всего по снимкам распознаются почвы гидроморфного ряда: тундровые болотные, болотно-луговые почвы в тундровой зоне; торфяно-глеевые, торфяные и лугово-болотные почвы в лесной зоне; луговые; лугово-черноземные; лугово-каштановые в степной зоне [15]. По прямым дешифровочным признакам хорошо распознаются засоленные участки, которые широко распространены в степной и полупустынной зонах. Их дешифрирование, как правило, не представляет сложностей, так как кристаллы солей на поверхности почвы придают ей характерный белый цвет. В синтезе каналов

SWIR-NIR-RED некоторые участки солончаков имеют голубоватый оттенок – это характерно для пересыхающих соленых озер, где соляная корка может быть хорошо увлажнена (рис. 3.2.8). При этом сухие участки будут иметь ярко-белый цвет, участки покрытые солью с высоким влагосодержанием – светло-голубой или бирюзовый, а покрытые водой – синий оттенок.

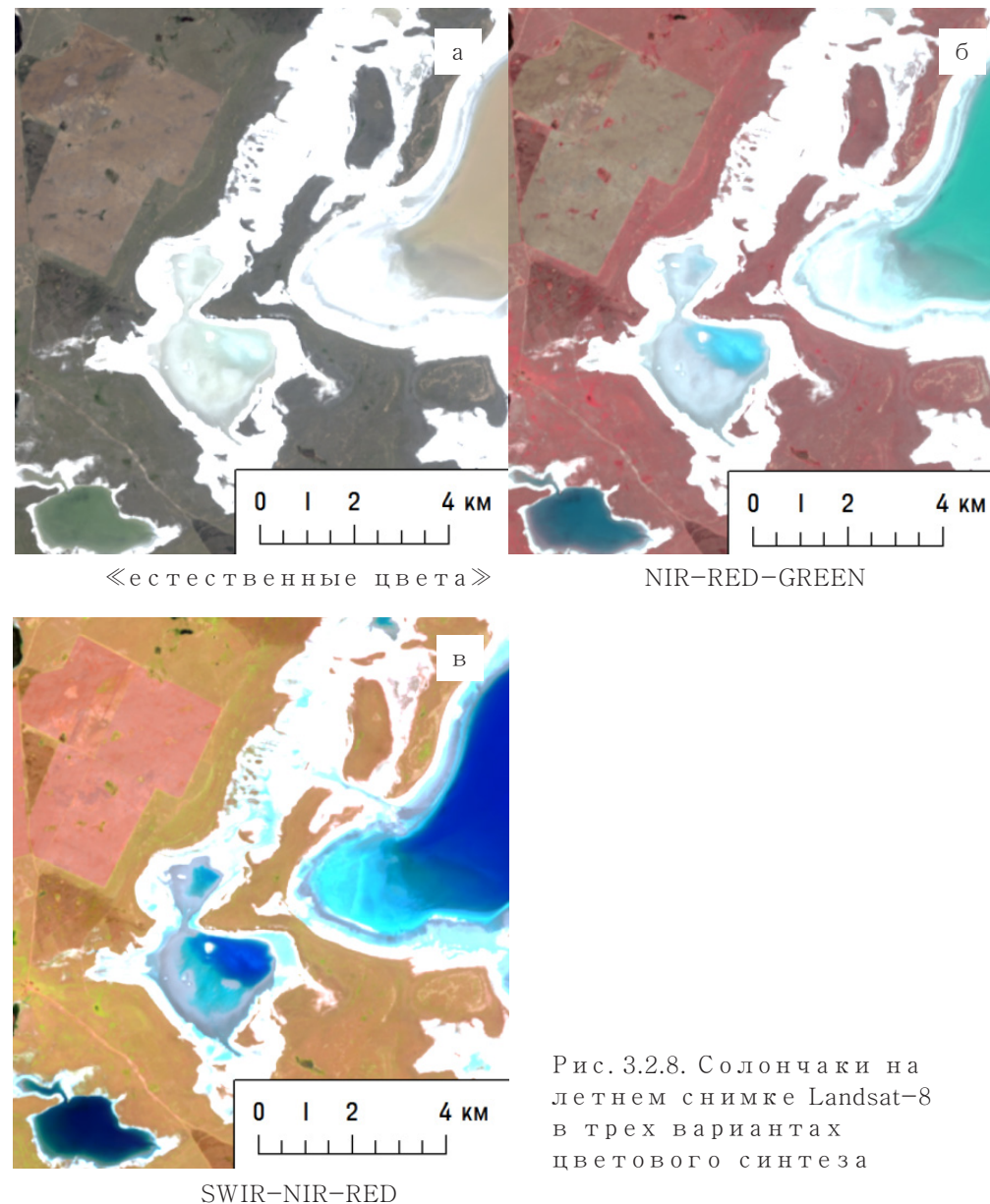


Рис. 3.2.8. Солончаки на летнем снимке Landsat-8 в трех вариантах цветового синтеза

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:

$$NDSI = (green - swir) / (green + swir)$$

$$NDFSИ = (nir - swir) / (nir + swir)$$

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.

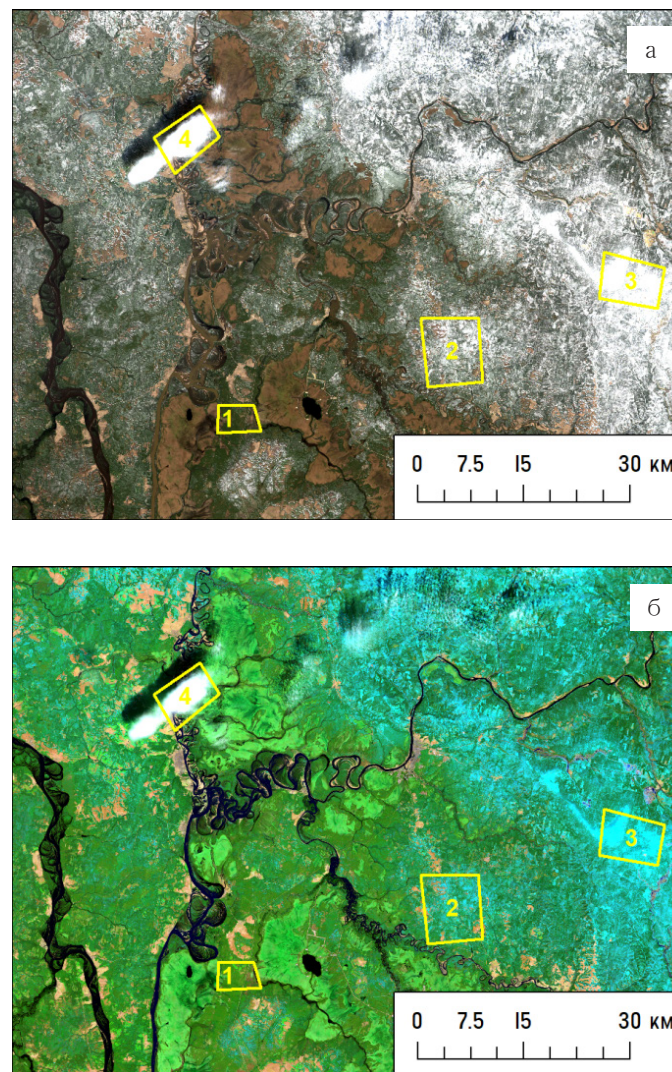


Рис. 3.3.1. Участки, освободившиеся от снега (1), покрытые снегом частично (2) и полностью (3), и облачность (4) на весеннем снимке Landsat-8, в вариантах цветового синтеза «естественные цвета» (а) и SWIR-NIR-RED (б)

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. 3.3.2. 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) сохранился сплошной снежный покров.

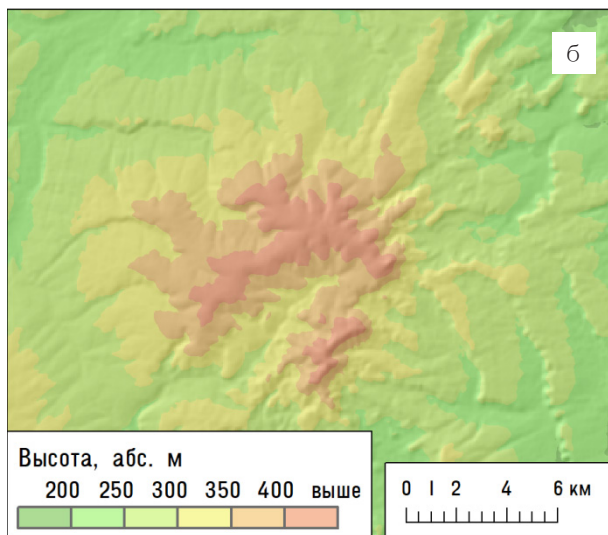
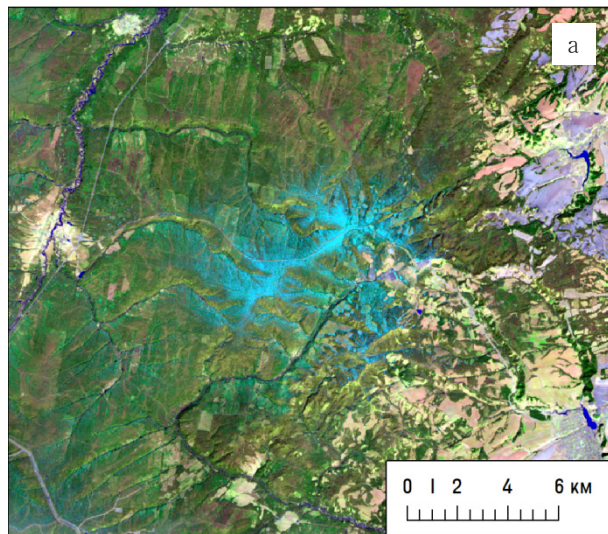


Рис. 3.3.2. Характерное распределение снежного покрова на возвышенности в конце периода снеготаяния на весеннем снимке Landsat-8, в цветовом синтезе «SWIR-NIR-RED (а) и цифровая модель рельефа этой же территории

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.

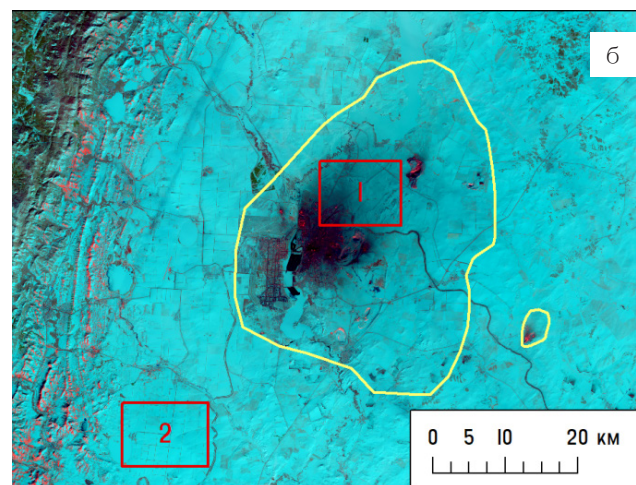
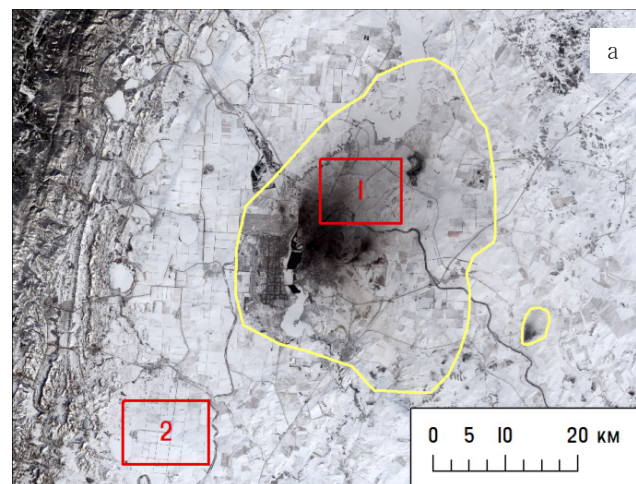


Рис. 3.3.3. Ареал загрязнения снежного покрова вблизи Магнитогорского металлургического комбината на снимке Landsat-8, полученном в конце зимы (февраль 2015 г.), в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б) Красными прямоугольниками выделены участки загрязненного и чистого снежного покрова, показанные на рис. 3.3.4.

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 (рис. 3.3.3, 3.3.4). Различия кривых спектральной отражательной способности чистого и загрязненного снежного покрова, полученных по снимку Landsat, характеризует рис. 3.3.5.

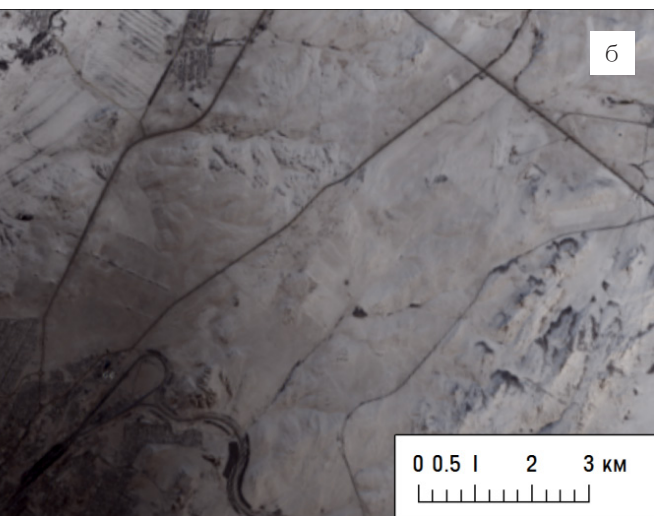
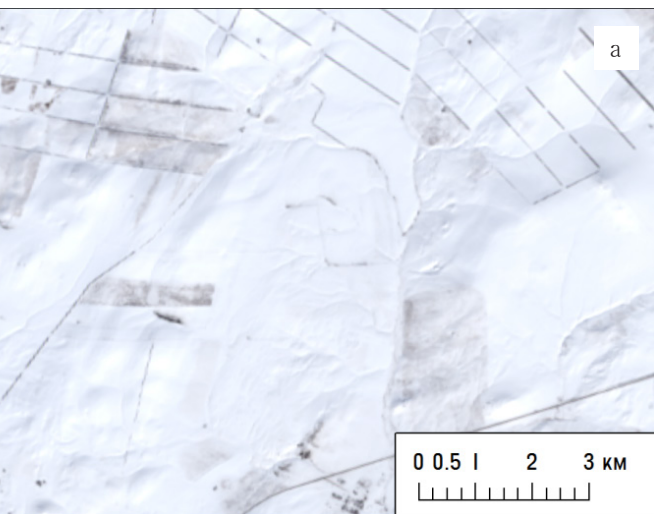


Рис. 3.3.4. Чистый (а) и сильно загрязненный (б) снежный покров на снимке Landsat-8, полученном в феврале 2015 г., в синтезе естественных цветов (район Магнитогорского металлургического комбината)

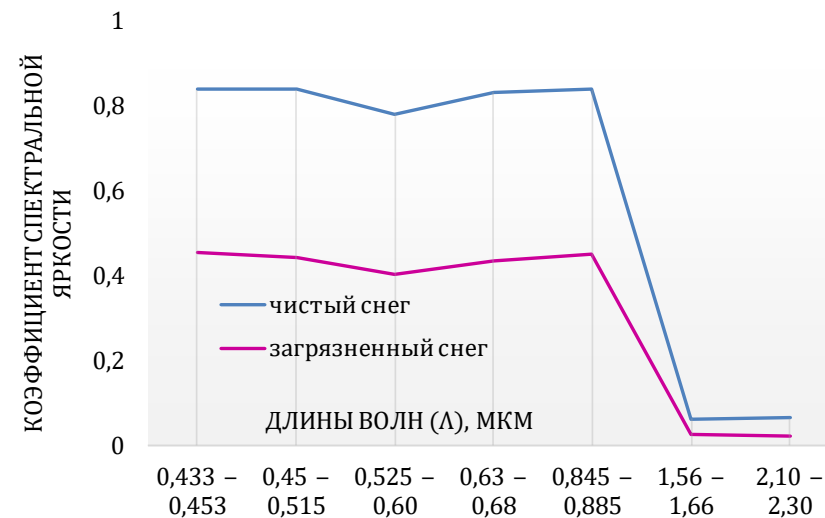


Рис. 3.3.5. Кривые спектральной отражательной способности чистого и загрязненного снежного покрова, построенные по снимку Landsat-8

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. 3.3.6). 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 (рис. 3.3.6, а).

Формирующийся ледовый покров в осенний период, или шуга, существенно отличается по спектральным характеристикам от обычного ледового покрова. Он полупрозрачный и в синтезе каналов SWIR-NIR-RED имеет различные оттенки, переходные от цвета воды к цвету льда (в зависимости от степени прозрачности). У берегов в этот период формируются забереги (ледовый припай), который может быть покрыт снегом и имеет те же признаки, что и покрытый снегом лед в зимний и весенний период (рис. 3.3.7).

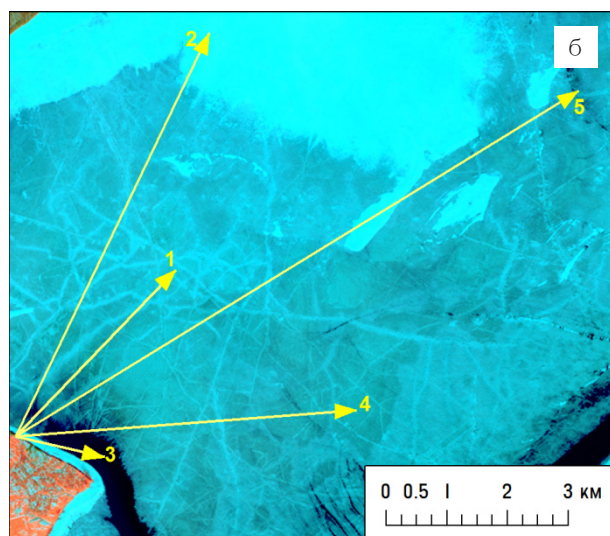
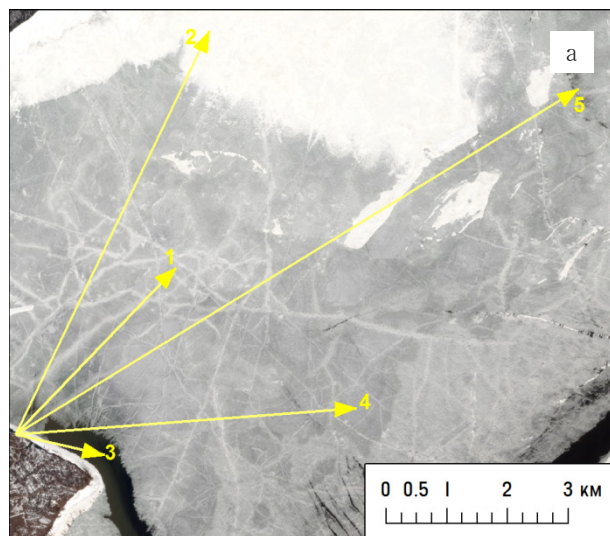


Рис. 3.3.6. Сплошной ледовый покров (1), лед, покрытый снегом (2), участок открытой воды (3), лед, покрытый тонким слоем воды (4) и трещина во льду (5) на Камском водохранилище. Снимок Landsat-8 в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

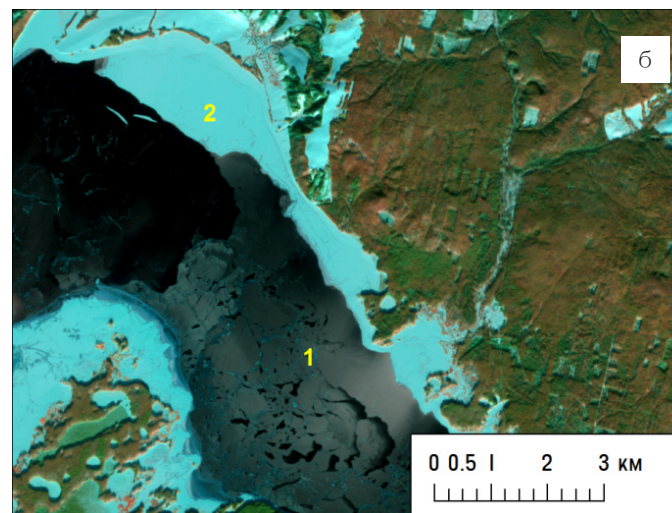
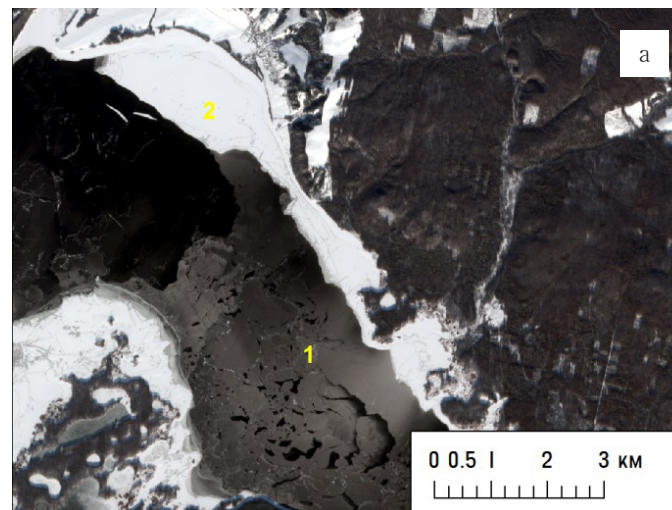


Рис. 3.3.7. Формирующийся ледовый покров (1) и ледовый припай (2) на осеннем снимке Landsat-8 в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Горное оледенение

Одной из важнейших задач космического мониторинга снежно-ледовых объектов суши является картографирование и анализ динамики ледников. Для дешифрирования ледников также в основном используется синтез каналов SWIR-NIR-RED. Горные ледники всегда имеют две зоны: зону питания (выше снеговой линии, где накопление снега и льда превышает его потери на таяние и испарение) и зону абляции (ниже снеговой линии, где потери снега и льда превышают объем накопления). На снимках за вторую половину лета и начало осени, оптимальных для изучения

ледников, эти зоны выделяются очень четко. В зоне питания лед чаще всего покрыт снегом (фирном), в основном именно снег определяет спектральные характеристики, поэтому преобладает ярко-голубой цвет. В зоне абляции снежный покров в этот период обычно отсутствует, спектральные характеристики определяет лед и морена. Поэтому эта зона имеет цвет переходный от темно-синего к темно-зеленому. Граница зон по высоте примерно соответствует снеговой линии (рис. 3.3.8).

В ряде горных систем, высота которых недостаточна для формирования полноценного горного оледенения (например, на Северном Урале), выше границы леса формируются *снежники*. Они образуются в пониженных формах рельефа (цирках и карах), где в течение зимы скапливается снег, и высота снежного покрова может достигать нескольких метров. Иногда снежники сохраняются в течение всего летнего сезона.

Снежники, как и другие снежно-ледовые объекты, успешно дешифрируются по снимкам в синтезе каналов SWIR-NIR-RED. В данном синтезе они имеют ярко-голубой цвет, в то время как в синтезе естественных цветов они могут быть ярко-белыми и не всегда отличаются, например, от освещенных каменистых склонов (рис. 3.3.9).

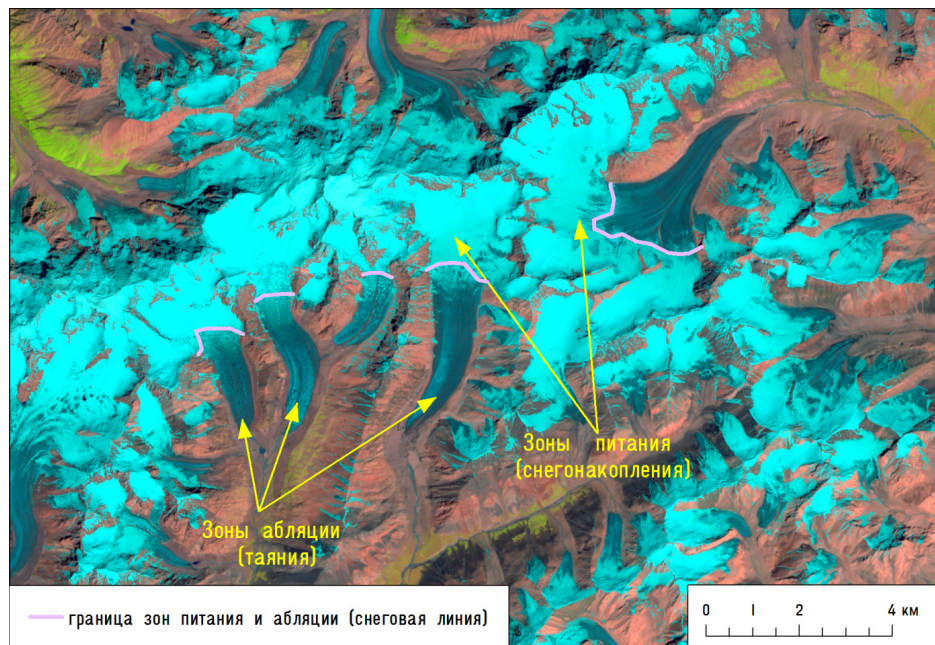


Рис. 3.3.8. Зоны питания и абляции горных ледников на космическом снимке Landsat-8, синтез каналов SWIR-NIR-RED (хр. Терской-Алатау, Тянь-Шань)

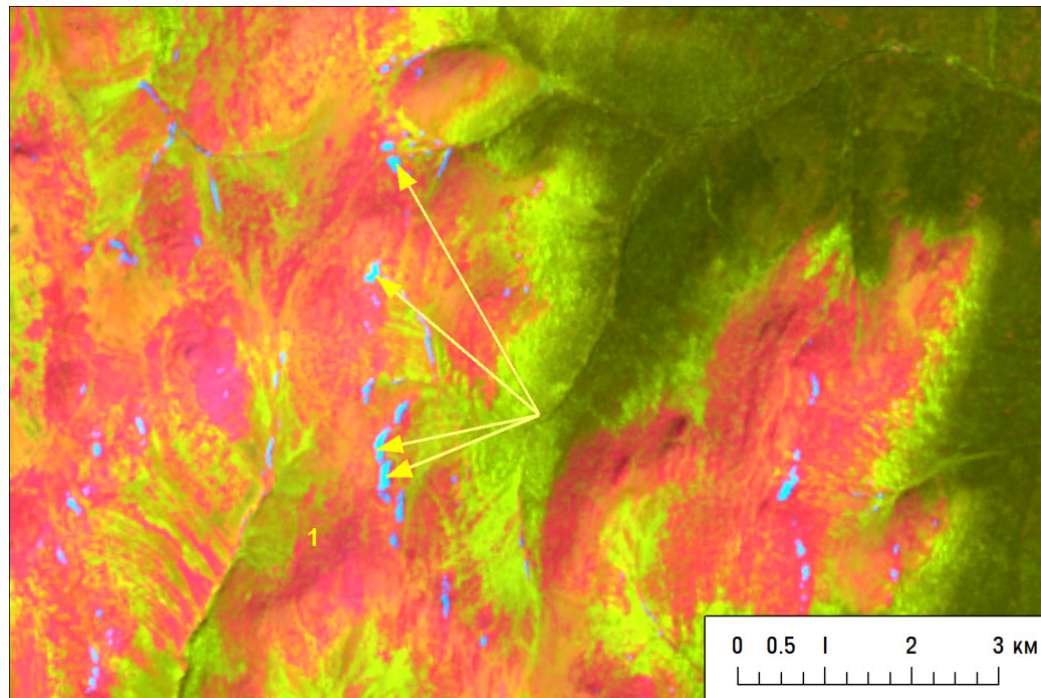


Рис. 3.3.9. Снежники на Северном Урале на снимке Landsat-8, полученном в летний период (синтез каналов SWIR-NIR-RED)

Особой формой оледенения, характерной для зоны многолетней мерзлоты, являются *наледы*. Наледи образуются в местах выхода на поверхность подземных вод, или же там, где происходит перемерзание водотоков. Площадь отдельных наледей в весенний период достигает 10 км² и более, а их таяние может продолжаться вплоть до сентября. В некоторых горных районах северо-востока Якутии и Магаданской области наледные участки занимают свыше 1% территории.

Как и все снежно-ледовые объекты, наледы хорошо дешифрируются по снимкам в синтезе каналов SWIR-NIR-RED, на которых они имеют ярко-голубой цвет (рис. 3.3.10). Для их выделения эффективны те же спектральные индексы, что и для выделения снега (например, NDSI). Рекомендуется использовать снимки, полученные во второй половине мая или в июне, т.е. поздней весной, после схода снежного покрова. До этого наледы покрыты снегом и не распознаются, а к середине лета многие наледы полностью стаивают [31].

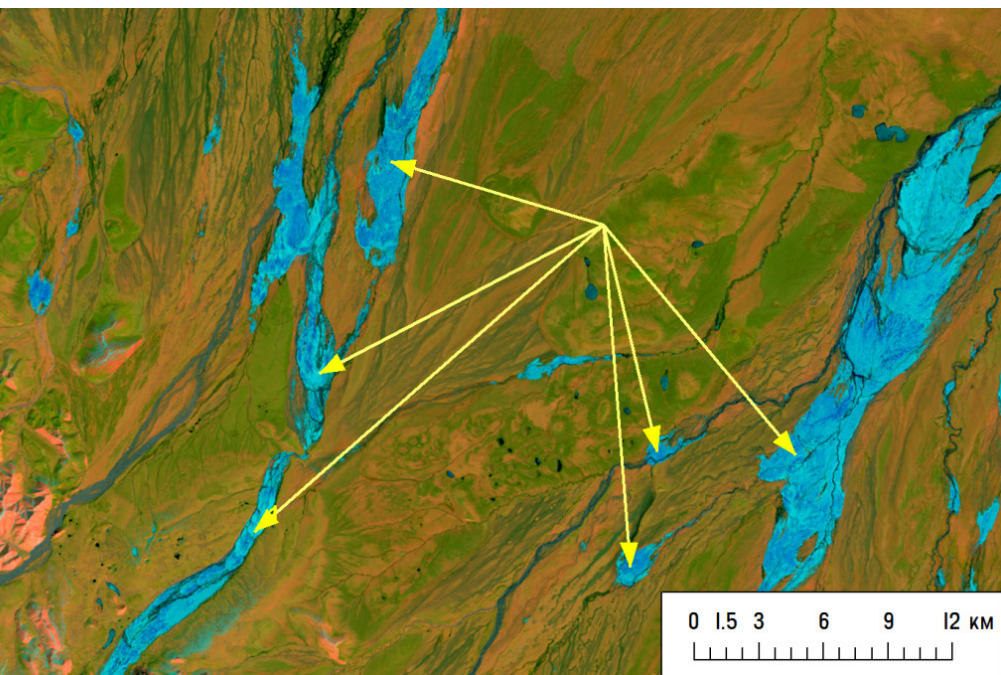


Рис. 3.3.10. Скопление крупных наледей (северо-восток Якутии) на снимке Landsat-8, полученном в июне (синтез каналов SWIR-NIR-RED)

3.4. Гидрографическая сеть

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.

Такие свойства водной поверхности позволяют достаточно легко выделять границу воды и суши или затопленные участки территории по снимкам в автоматическом режиме, используя для этого специальные спектральные индексы. Наиболее эффективные из них основаны на разности спектральной яркости в видимой и средней ИК зонах спектра, например модифицированный нормализованный разностный водный индекс mNDWI, предложенный в работе [36]. Данный индекс рассчитывается по формуле:

$$mNDWI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$$

где *GREEN* - отражение в зеленой зоне спектра, *SWIR* - отражение в красной области спектра/

В свою очередь, в видимом диапазоне спектра водная поверхность отражает существенную часть поступающего солнечного излучения. В результате выделить по снимкам в естественных цветах границу воды и суши становится существенно сложнее. Часть излучения в видимом диапазоне проникает в толщу воды, что позволяет использовать снимки для изучения некоторых свойств водных объектов (мутности, загрязнения и др.). Все перечисленные особенности в первую очередь относятся к чистой воде. Под влиянием высокой концентрации взвешенных веществ, размножения водной растительности или сильного загрязнения спектральные свойства воды могут существенно измениться, в первую очередь в видимом диапазоне (рис. 3.4.1).

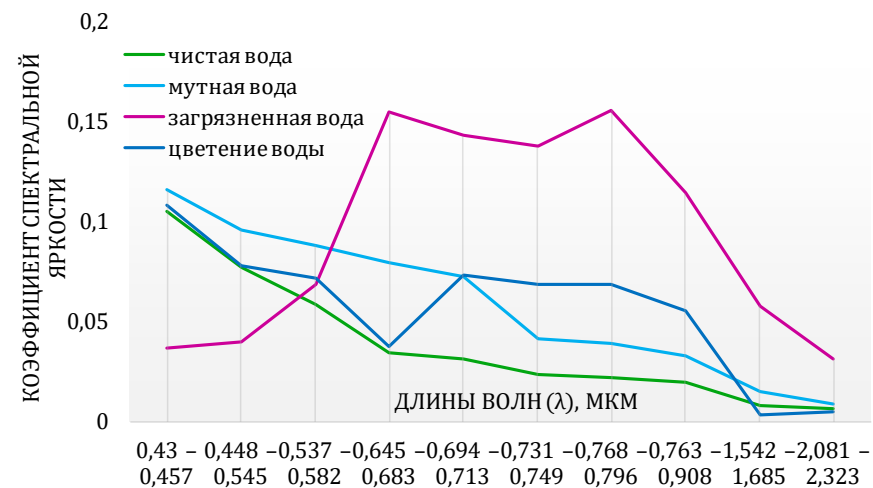


Рис. 3.4.1. Кривые спектральной отражательной способности чистой и загрязненной водной поверхности, построенные по снимкам Sentinel-2

Распознавание крупных водных объектов (рек, озер, водохранилищ) по снимкам оптического диапазона обычно не представляет каких-либо трудностей. Наибольший интерес представляет решение следующих задач:

- Определение типа или происхождения объектов гидрографической сети (в первую очередь озер и болот).
- Изучение динамики водных объектов по снимкам (в частности, русловых деформаций, изменения площади озер и т.п.).
- Изучение дешифровочных признаков, имеющих отношение к свойствам воды (мутность, соленость, загрязнение).
- Решение прикладных задач, в частности мониторинг и картографирование зон затопления по снимкам.

Выбор оптимального синтеза спектральных каналов зависит от решаемой задачи. В общем случае для выделения самих водных объектов используется синтез SWIR-NIR-RED, а для батиметрических исследований и оценки свойств воды (мутности, загрязнения) оптимальный синтез – естественные цвета.

Речная сеть (крупные и средние реки) легко дешифрируется на снимках в синтезе SWIR-NIR-RED на основе вышеописанных свойств воды. При этом особенностью равнинных рек является их меандрирование и большое количество старичных озер в пойме (рис. 3.4.2, а). В свою очередь, для горных рек характерна меньшая извилистость, хотя в русле могут присутствовать острова (рис. 3.4.2, б).

В отличие от крупных и средних рек, малые реки и ручьи на снимках среднего разрешения дешифрируются только по косвенным признакам, так как ширина русла значительно меньше размера пиксела изображения, к тому же русло обычно скрыто кронами деревьев. Основными косвенными признаками (индикаторами) малых рек и ручьев является рельеф и растительность. В районах с пересеченным рельефом долины малых водотоков обычно хорошо просматриваются благодаря крутым склонам (рис. 3.4.3, а). На снимках равнинных территорий более важным косвенным признаком (индикатором) малых рек и ручьев будет уже не рельеф, а растительность, а именно сохранившиеся старовозрастные леса в водоохранных зонах, или участки лесной растительности в долинах при преобладании сельхозугодий на водоразделах (рис. 3.4.3, б). В лесной зоне индикатором наличия водотока может быть протяженный участок пойменно-луговой растительности (рис. 3.4.3, а).

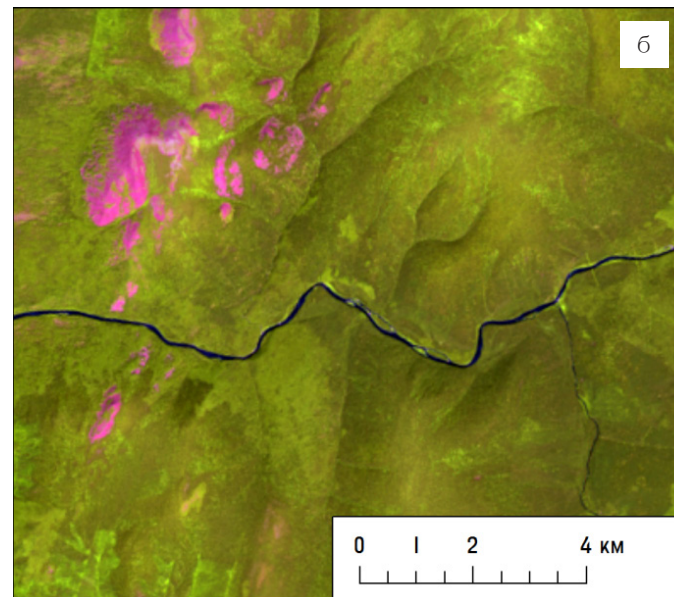
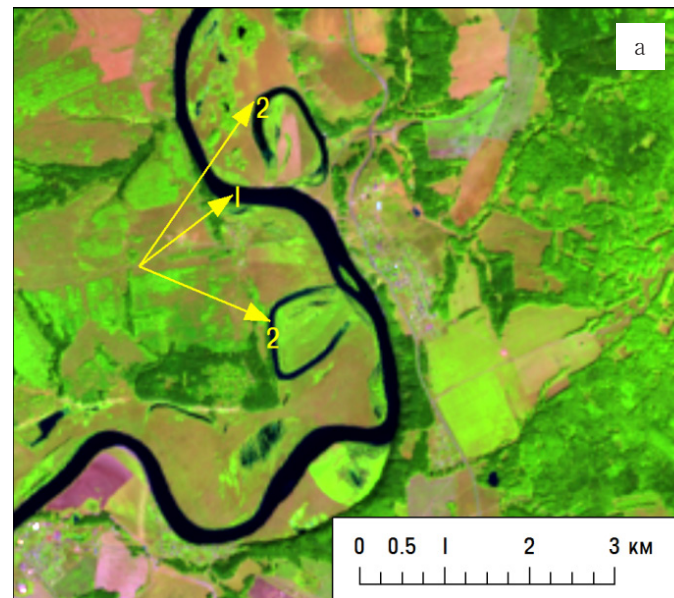


Рис. 3.4.2. Русло равнинной (а) и горной реки (б) на снимке Landsat-8, полученном в летний период. Синтез каналов SWIR-NIR-RED. 1 - русло, 2 - старичные озера

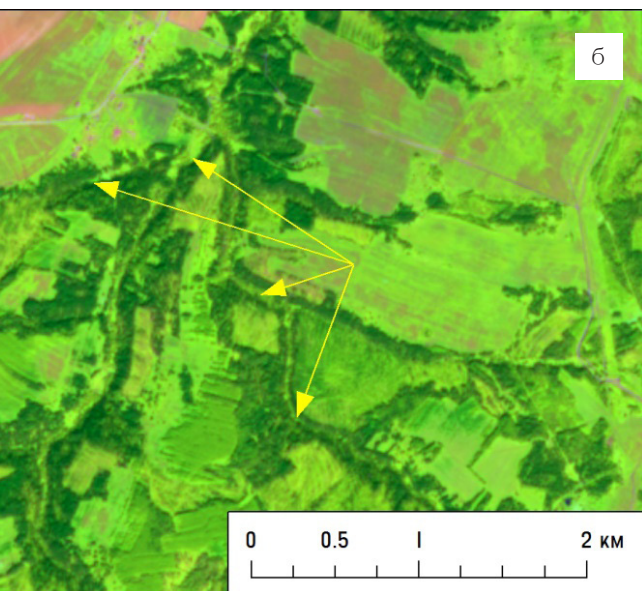
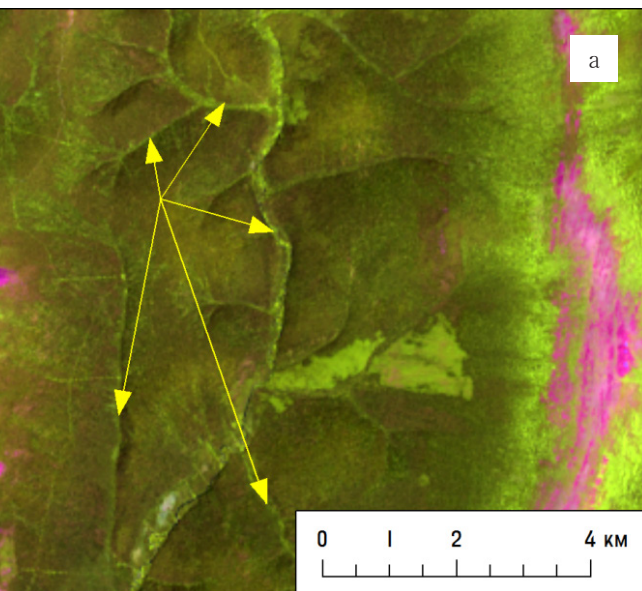


Рис. 3.4.3. Идентификация малых рек и ручьев по снимкам Landsat-8 (синтез каналов SWIR-NIR-RED) на территории с горным рельефом (а) и с равнинным рельефом (б)

Также по космическим снимкам (как одиночным, так и разновременным) изучаются современные русловые процессы: образование или срезание излучин, формирование новых островов, побочней, гряд в русле. При этом оптимально использовать снимки в естественных цветах, на которых лучше различимы формы руслового рельефа (рис. 3.4.4).

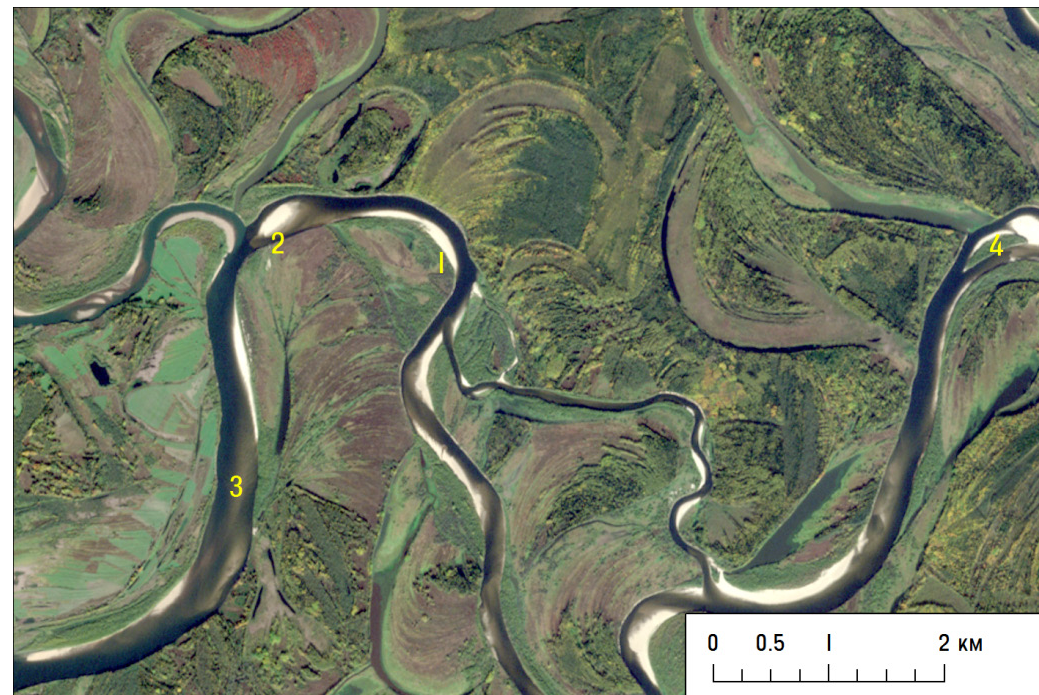


Рис. 3.4.4. Различные формы руслового рельефа (1 - побочень, 2 - осередок, 3 - песчаная отмель, 4 - остров) на снимке Sentinel-2, полученном в осенний период, синтез естественных цветов

Характерные отличительные признаки на снимках имеют также устья рек. Известны два основных типа устьевых областей – это *дельта* (устье в виде низменной равнины, сложенной речными наносами и прорезанной многочисленными протоками – ветвящимися руслами) и *эстуарий* (воронкообразный залив в устье реки, глубоко вдающийся в долину). Иногда они могут быть расположены последовательно. На рис. 3.4.5 представлен типичный вид участка дельты (р. Лены) и последовательности дельты и эстуария (р. Енисей) на снимке Landsat.

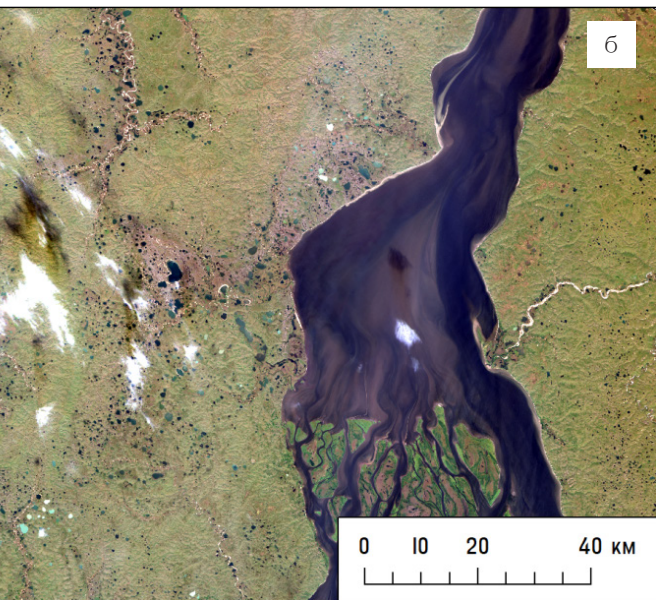
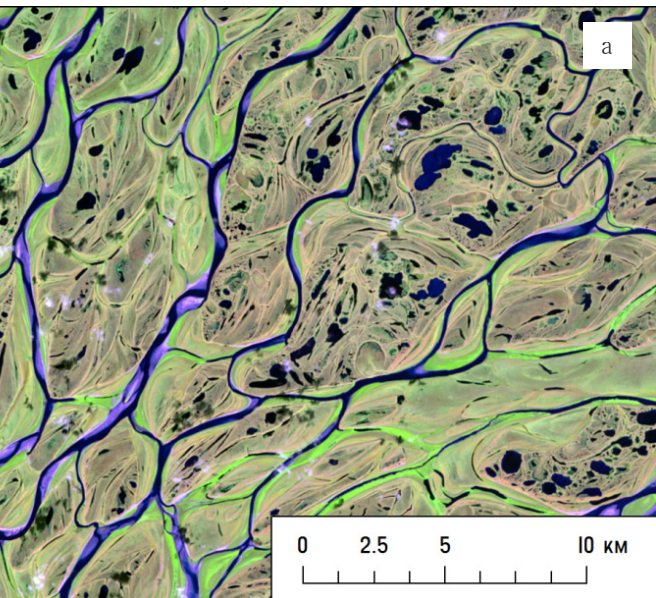


Рис. 3.4.5. Дельта реки (а) и эстуарий (б) на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе естественных цветов

Озера

По космическим снимкам во многих случаях можно определить происхождение озерной котловины. Озера по происхождению котловин классифицируются на тектонические, ледниковые, ледниково-тектонические, старичные, пойменные, болотные, карстовые, термокарстовые, вулканические. Каждый тип озер имеет свои характерные дешифровочные признаки, в основном контекстные (косвенные, основанные на положении в пространстве и относительно других объектов). При этом индикатором может быть рельеф прилегающей территории, наличие водотоков или особенности растительности. Прямые признаки информативны только для некоторых типов озер.

Например, озера тектонического происхождения (расположенные в разломах) часто имеют протяженность, в несколько раз превышающую максимальную ширину, в то время как крупные озера ледникового происхождения обычно квазиокруглые. Дешифровочным признаком горных озер ледникового происхождения является близость ледников или их положение в цирках, карах. Озера болотного происхождения имеют квазиокруглую форму и расположены в пределах крупных болотных массивов, сами озера обычно невелики по площади. Карстовые и термокарстовые озера также почти всегда имеют квазиокруглую форму и расположены группами (термокарстовые – крупными скоплениями). При этом карстовые озера обычно имеют незначительную площадь, до нескольких га (рис. 3.4.6, д). Термокарстовые озера распространены крупными скоплениями в зоне многолетней мерзлоты и могут занимать до 20-30% всей площади территории (рис. 3.4.6, е). Старичные озера, образовавшиеся в результате «срезания» излучин рек, имеют характерную форму этих излучин. Пойменные озера отличаются от старичных тем, что расположены в поймах рек, но не связаны с отделившимися излучинами. Примеры космических снимков озер с различными по происхождению котловинами представлены на рис. 3.4.6.

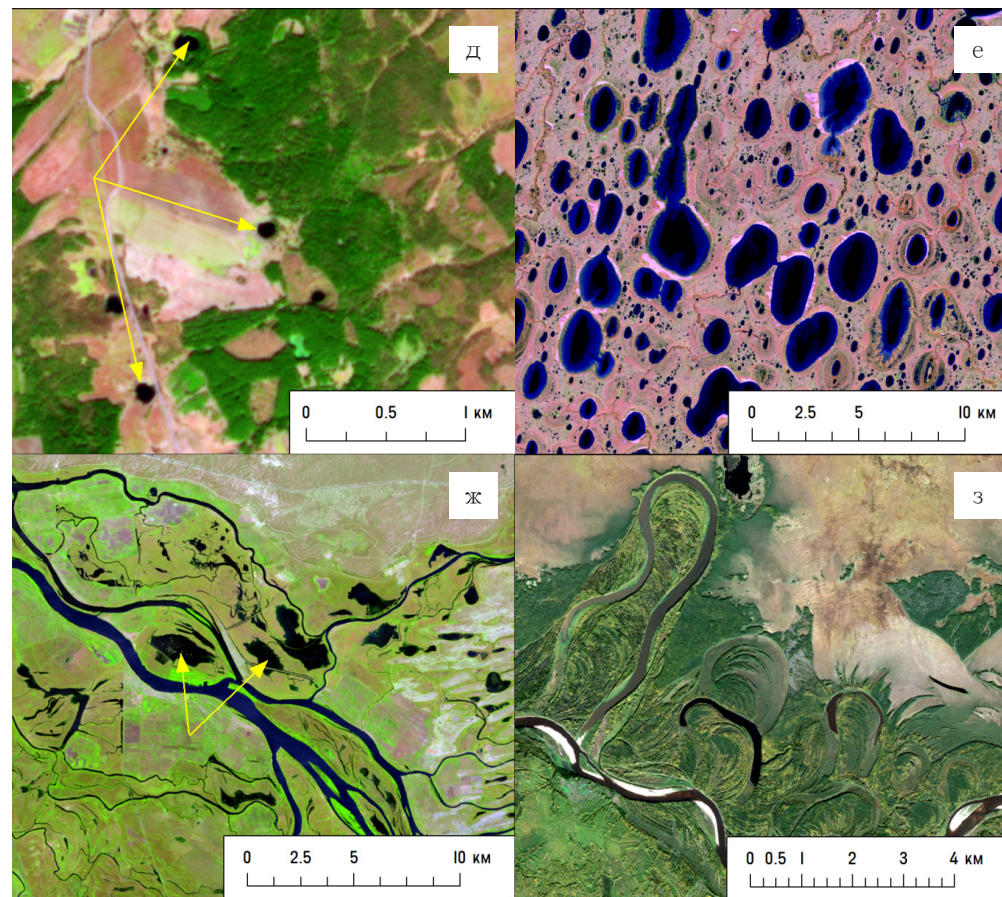
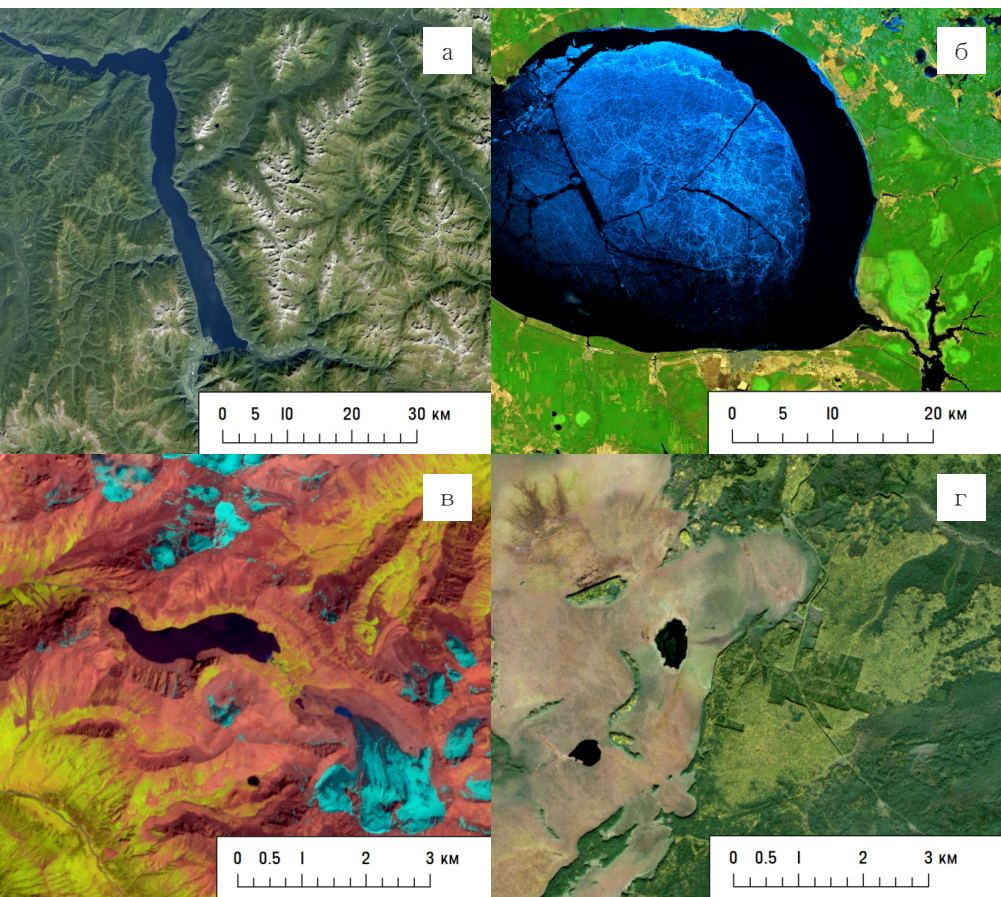


Рис. 3.4.6. Озера с различными по происхождению котловинами на снимках Landsat-8: а - тектоническое, б - ледниковое (связанное с древним ледником), в - горно-ледниковое, г - болотные, д - карстовые, е - термокарстовые, ж - пойменные, з - старичные. Синтез каналов естественные цвета (рис. а, г, е, з), синтез SWIR-NIR-RED (рис. б, в, д, ж)

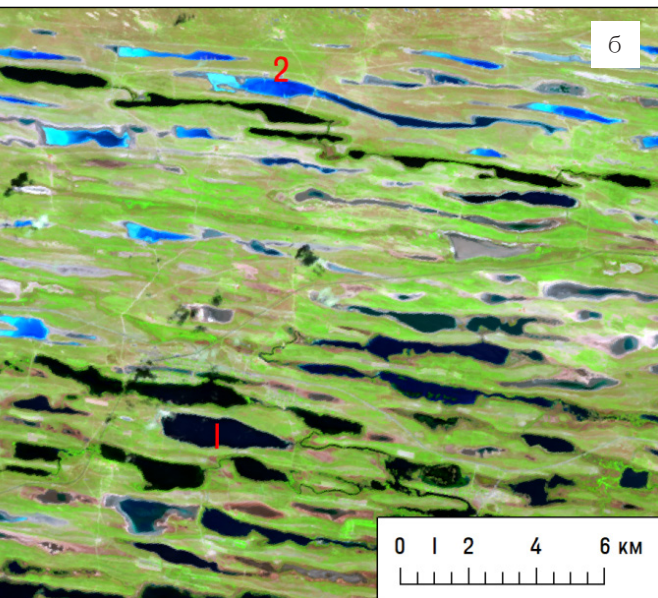
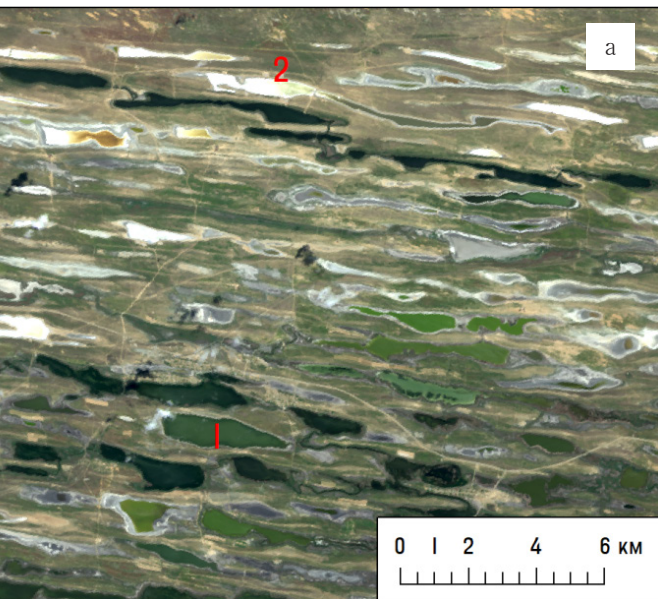


Рис. 3.4.7. Пресные пойменные (1) и соленые (2) озера на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Вторым важнейшим свойством озер, для оценки которого могут быть использованы снимки, является соленость. Пресные и соленые озера могут быть успешно разделены по прямому дешифровочному признаку – цвету воды и донных отложений. Наиболее существенны отличия в видимом диапазоне спектра, в котором соленые озера имеют высокую яркость (вплоть до ярко-белого цвета) и могут вообще не распознаваться как водные объекты. Синтез SWIR-NIR-RED позволяет отличить соленое озеро от солончака, т.к. озеро будет иметь темно – синий цвет (за счет низкого отражения водой в ближней и средней ИК зонах спектра), а солончак (на поверхности которого вода отсутствует или занимает небольшую площадь) будет ярко-голубым. Пресные и солоноватые озера в этом синтезе имеют темно-синий, почти черный цвет водной поверхности (рис. 3.4.7).

Водохранилища и пруды

Основным дешифровочным признаком *водохранилищ и прудов*, позволяющим отличить их от озер, является наличие плотины и характерная вытянутая форма с заливами, повторяющая в той или иной степени геометрию речной долины. Из озер аналогичную форму имеют только завально-запрудные озера в горах (но они достаточно редки). Лишь немногие водохранилища, расположенные в обширных понижениях рельефа (такие, как Рыбинское водохранилище на Волге) имеют квазиокруглую форму. Что касается плотин, то у крупных водохранилищ и прудов плотины обычно расположены в пределах населенных пунктов, что также можно считать косвенным дешифровочным признаком. Как и для других водных объектов, для определения площади водохранилищ лучше всего подходят снимки в синтезе каналов SWIR-NIR-RED (рис. 3.4.8).

У некоторых крупных водохранилищ существует так называемая *зона переменного подпора* – участки мелководий, которые подвергаются периодическому осушению при понижении уровня воды. Минимальные уровни воды на водохранилищах наблюдаются обычно весной перед началом весеннего половодья, в некоторых случаях – осенью, после засушливого летнего периода. Для выделения зоны переменного подпора сопоставляют разновременные снимки акватории (рис. 3.4.9), либо используют автоматические методы выделения воды (такие, как нормализованный разностный водный индекс mNDWI) и определяют разность площади водной поверхности. Границы зоны переменного подпора хорошо видны и по одиночному снимку, полученному в период низкого уровня воды, т.к. в этой зоне обычно отсутствует растительность.

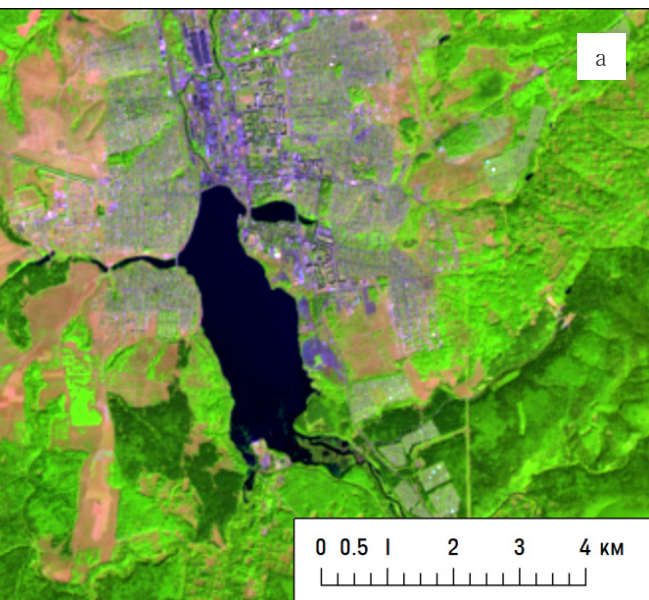


Рис. 3.4.8. Плотины и водохранилища: заводской пруд (а) и плотина крупной гидроэлектростанции (б) на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

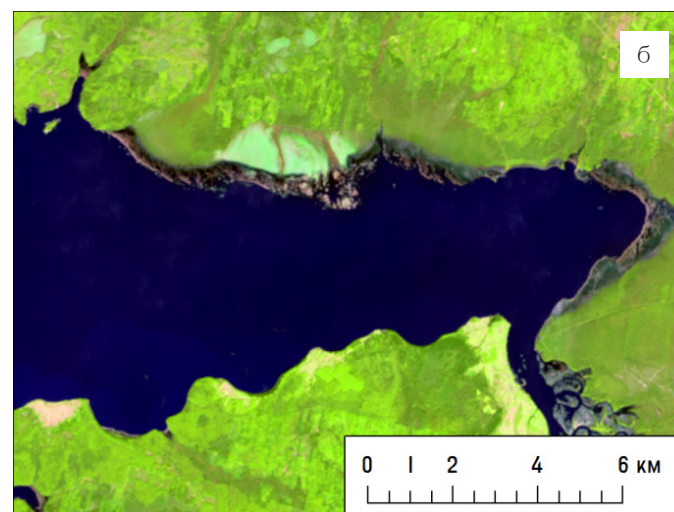
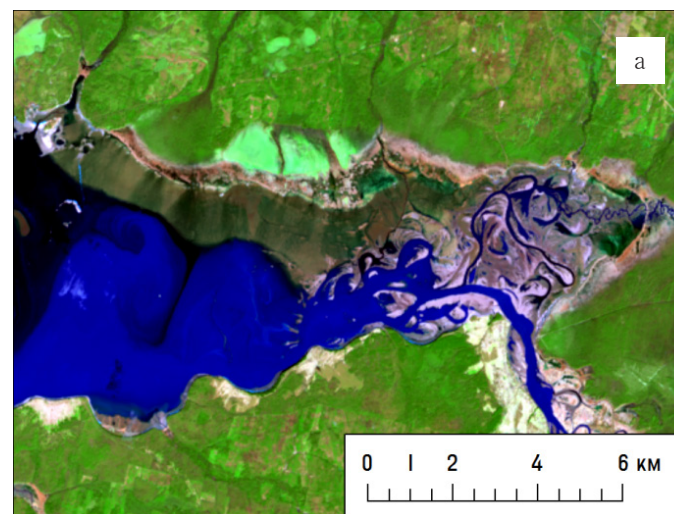


Рис. 3.4.9. Зона переменного подпора Камского водохранилища на снимках, полученных в период низкого (а) и нормального (б) уровней воды, синтез каналов SWIR-NIR-RED

Болота

Болота занимают обширные площади в пределах таежной и тундровой зон. Наиболее распространены верховые сфагновые болота на плоских водораздельных пространствах, в то время как площадь низинных болот, приуроченных к речным поймам, менее значительна. Также сильно заболочены террасы долин крупных рек (в Пермском крае – террасы долины Верхней Камы).

Дешифровочные признаки болот определяются преобладающим растительным покровом, прежде всего наличием или отсутствием древесной растительности. Крупные массивы верховых сфагновых болот, распространенные в таежной зоне, обычно характеризуются отсутствием древесной растительности. В напочвенном покрове преобладают сфагновые мхи и кустарнички. Такие болота иногда называют тундровыми (из-за сходства их внешнего облика с тундрами). Леса (часто низкорослые, в основном сосновые) произрастают по периферии болотных массивов и на возвышенностях (гривах). Вокруг болот часто встречаются участки сухостоя (деревьев, погибших от переувлажнения почвы). Также на болотах широко распространены озера, котловины которых могут иметь старичное, болотное или ледниковое (для крупных озер) происхождение (рис. 3.4.10).

Обширные верховые болота хорошо распознаются по снимкам летнего сезона практически в любом спектральном синтезе. Спектральные характеристики зависят от степени увлажнения поверхности торфяной толщи и соотношения сухой и зеленой растительности. В целом поверхность, покрытая сфагновыми мхами и кустарничками, характеризуется достаточно высокой яркостью как в видимом, так и в ближнем и среднем ИК диапазонах. В синтезе естественных цветов она имеет различные оттенки светло-зеленого, бежевого, желтоватого, а в синтезе SWIR-NIR-RED характерный салатовый цвет. На этом фоне участки сосновых лесов на гривах выглядят темно-зелеными. Весьма информативны также текстурные признаки. Верховые болота имеют характерный рисунок изображения, показывающий наличие уклона болотного массива от центра к периферии.

Некоторая часть площади верховых и переходных болот все же покрыта лесной растительностью, причем такие заболоченные участки леса обычно представлены низкорослыми сосновыми насаждениями. Главным их дешифровочным признаком является характерная текстура изображения (значительно более сглаженная, чем для обычного леса). Также при сравнении с соседними лесными массивами, произрастающими в нормальных условиях увлажнения, можно отметить меньшую высоту деревьев в заболоченных лесах. Причем высота древостоя и соответственно неоднородность рисунка изображения увеличивается от центра болота к периферии (рис. 3.4.11). Часто сосновым лесом покрыты только окраинные части болот, а в центральной части древесная растительность отсутствует (рис. 3.4.12).

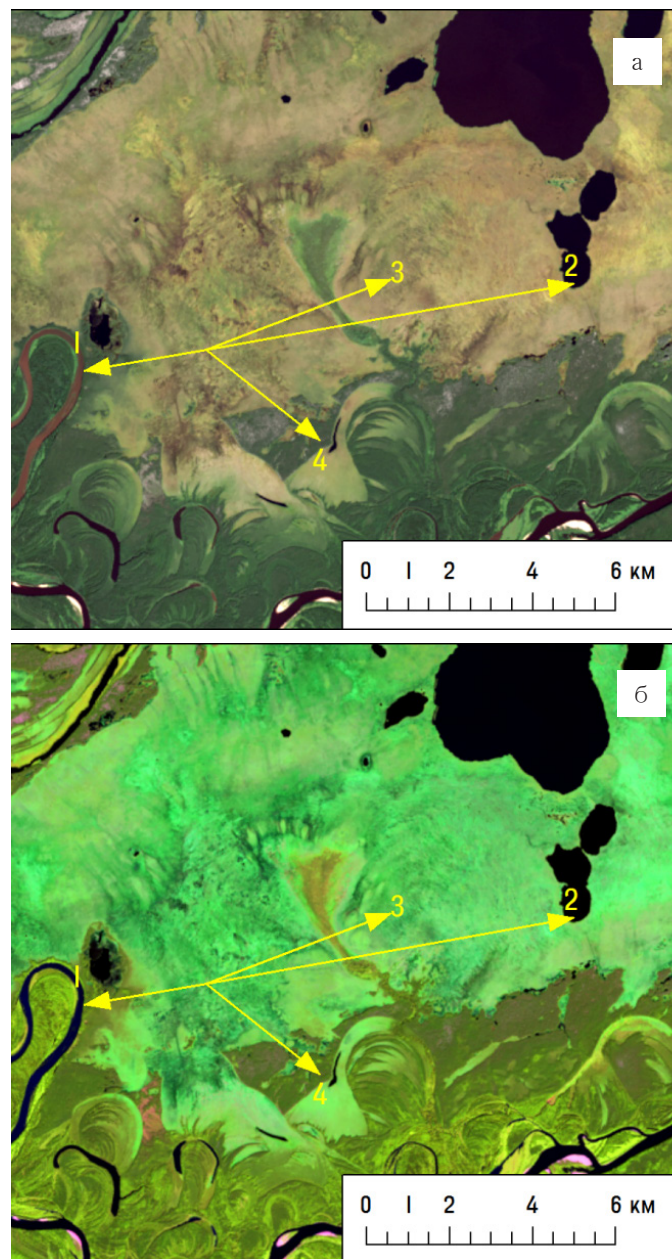


Рис. 3.4.10. Обширное верховое сфагновое болото на снимке Landsat-8 в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б).

Цифрами обозначены:

1 - старичное озеро, 2 - озеро болотного происхождения, 3 - мохово-кустарничковая болотная растительность, 4 - сосновый лес на песчаной возвышенности (гриве)

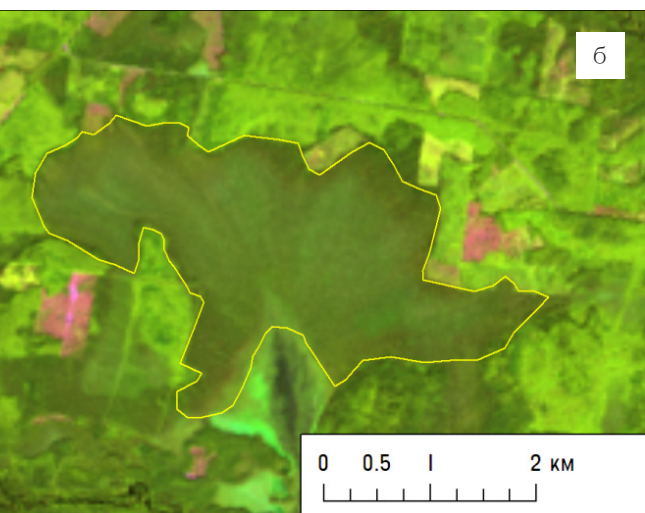
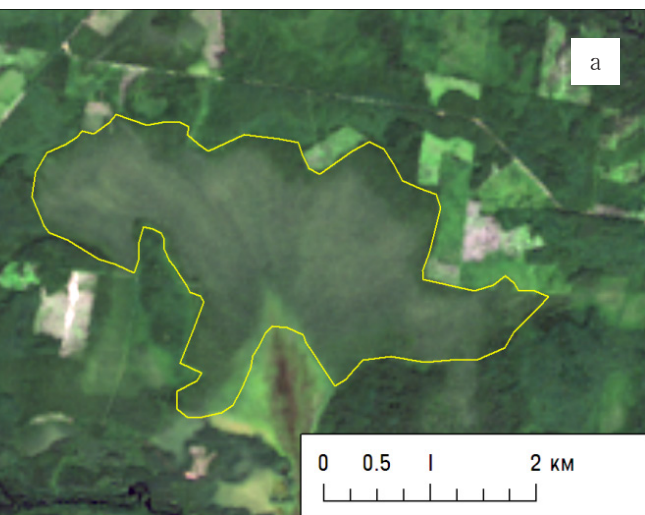


Рис. 3.4.11. Участок заболоченного леса в окружении разновозрастных вырубок на снимке Landsat-8 в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

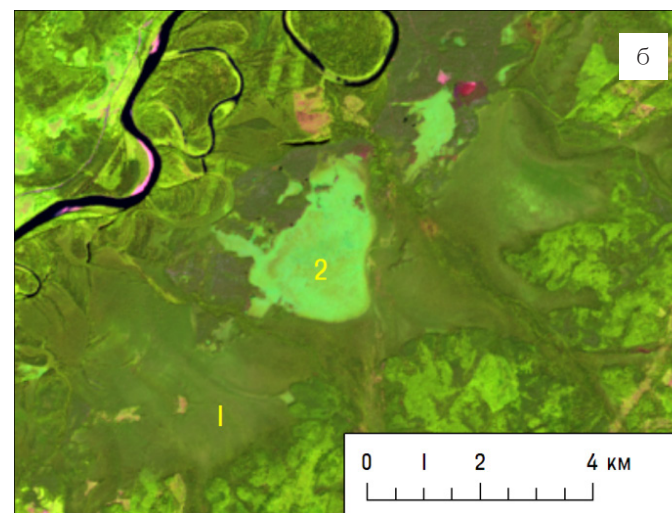
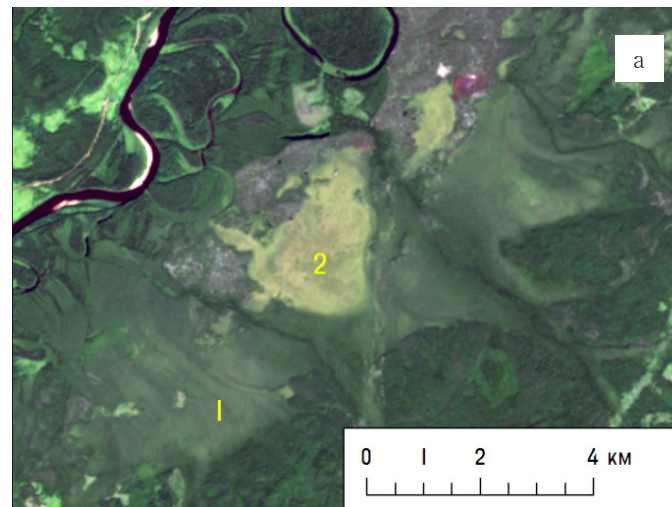


Рис. 3.4.12. Обширные площади заболоченных лесов (1) и безлесное сфагновое болото (2) на снимке Landsat-8 в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Различить по снимку верховые, переходные и низинные болота иногда затруднительно, такое разделение может быть проведено на основе положения относительно близлежащих речных долин. Верховые болота располагаются на водоразделах или на террасах долин крупных рек, переходные – обычно на террасах. Питаются они в основном за счет атмосферных осадков.

Низинные болота располагаются на месте бывших озер, в поймах рек и в периодически затопляемых понижениях, и питаются преимущественно грунтовыми водами. Низинные болота обычно занимают небольшие площади, в их растительном покрове господствуют различные осоки, зеленые мхи, высшая водная растительность (рогоз и др.). На снимках в синтезе SWIR-NIR-RED хорошо видны окна открытой воды и участки водной растительности (рис. 3.4.13).

Зоны затопления в поймах рек

Важной практической задачей является выделение по спутниковым снимкам зон затопления при прохождении половодий и паводков. Во-первых, рост частоты съемки и пространственного разрешения данных делает все более эффективным оперативный космический мониторинг наводнений. Во-вторых, по многолетним спутниковым данным можно определить максимально возможные площади затопления и объекты, попадающие в зоны риска.

Определение зон затопления по снимкам в оптическом диапазоне не представляет существенной сложности. Это связано с вышеописанными спектральными свойствами воды – крайне низкой отражательной способностью в ближней и средней ИК зонах спектра. Для автоматического определения зон затопления используются методы, основанные на разности «водных индексов» (например $mNDWI$). Разность площади водной поверхности вычисляется по двум снимкам, полученным в период низкого и высокого уровня воды. Для визуального дешифрирования зон затопления наиболее подходящим является синтез каналов SWIR-NIR-RED, в котором водная поверхность имеет темно синий, почти черный цвет и резко отличается от других видов поверхностей (рис. 3.4.14).

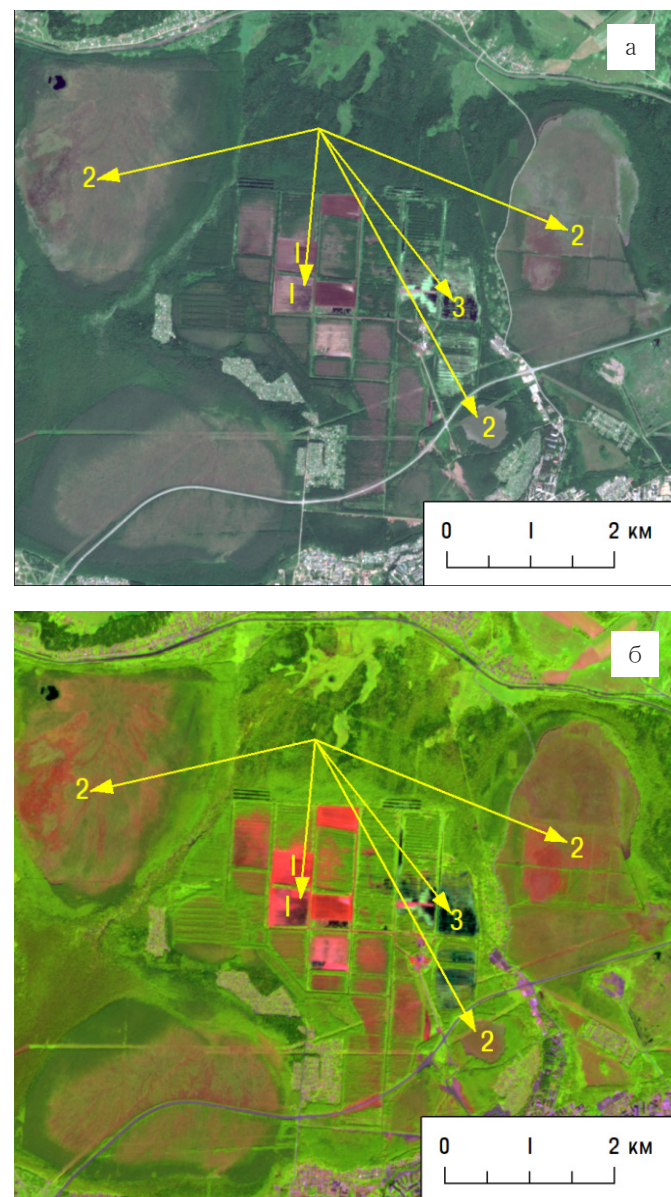


Рис. 3.4.13. Низинные болота в районе г. Краснокамск, Пермский край на снимке Sentinel-2 в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б): торфоразработки (1), болотные массивы (2) и участки открытой воды (3)

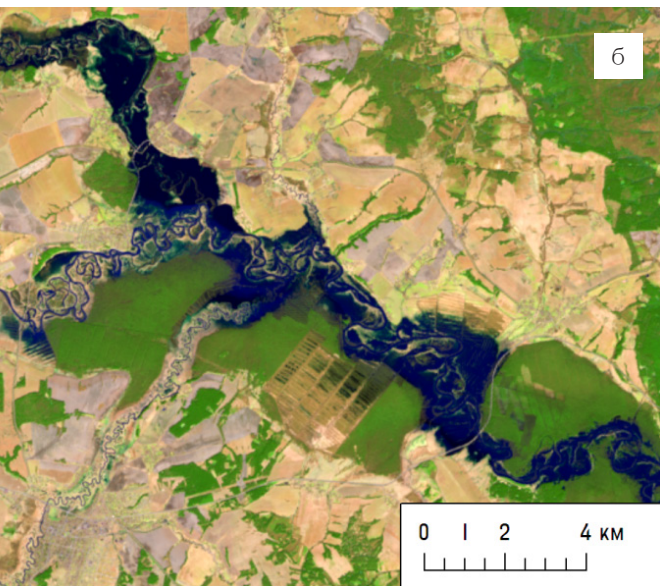
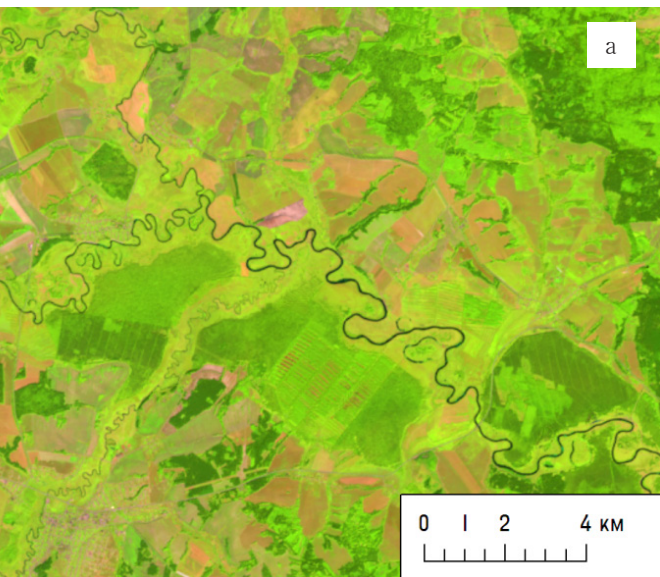


Рис. 3.4.14.
Выделение
зоны сезонного
затопления
на основе
сравнения двух
снимков Landsat-8,
полученных в
период летней
межи (а) и
весеннего
половодья (б),
синтез каналов
SWIR-NIR-RED (б)

3.5. ЛЕСНАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ, ПОРОДНЫЙ СОСТАВ И ВОЗРАСТНАЯ СТРУКТУРА ЛЕСОВ

Дешифрирование и картографирование породного состава и возрастной структуры лесов традиционно является одним из важнейших направлений использования данных космической съемки. На основе снимков низкого (Terra/Aqua MODIS, SPOT-Vegetation) и среднего (Landsat) пространственного разрешения создан ряд картографических продуктов, характеризующих лесной покров России в целом или ее отдельных регионов. Из первых можно отметить карту наземных экосистем Северной Евразии (<http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=317>) и Карту преобладающих пород и сомкнутости лесов России [2]. Также для территории России создана ежегодно обновляемая карта типов растительности по спутниковым данным Terra/Aqua MODIS. Особенности этой карты и ряда других продуктов описаны в монографии, изданной коллективом авторов из Института космических исследований РАН [1]. Из региональных продуктов за последние годы были созданы карта лесов Ханты-Мансийского автономного округа [25], и карта наземных экосистем Центрального федерального округа [4].

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 (рис. 3.5.1). 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.

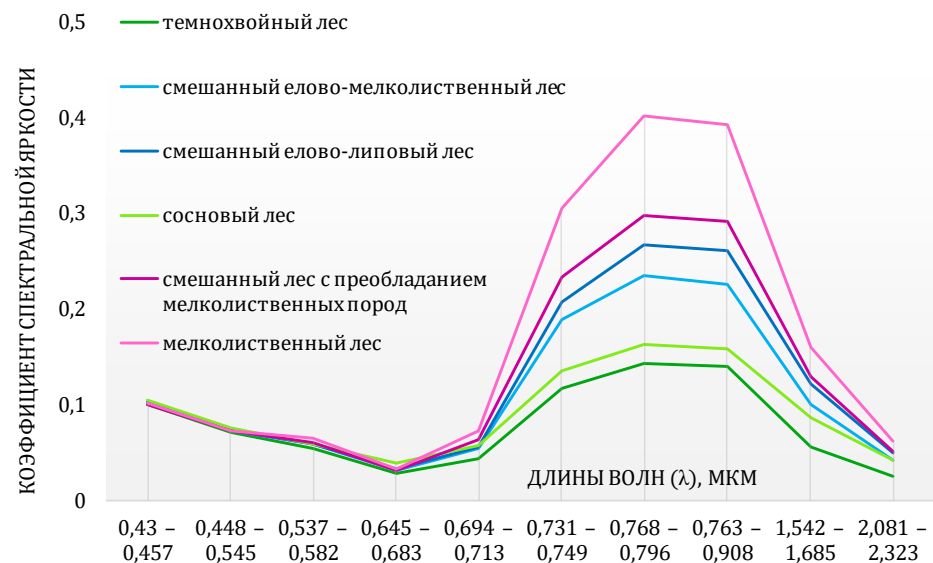


Рис. 3.5.1. Кривые спектральной отражательной способности лесов различного породного состава, построенные по снимкам Sentinel-2

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 (рис. 3.5.2, 3.5.3). Смешанный лес со значительным участием широколиственных пород (липы) в этом синтезе может иметь слегка желтоватый оттенок, который и будет его отличительным признаком (рис. 3.5.2, а).

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 (рис. 3.5.4).

Важно отметить, что в лесах с высокой полнотой спектральный образ формируется в основном за счет крон 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.

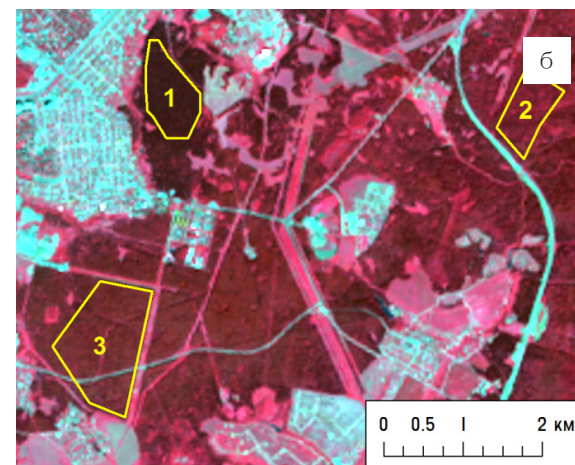
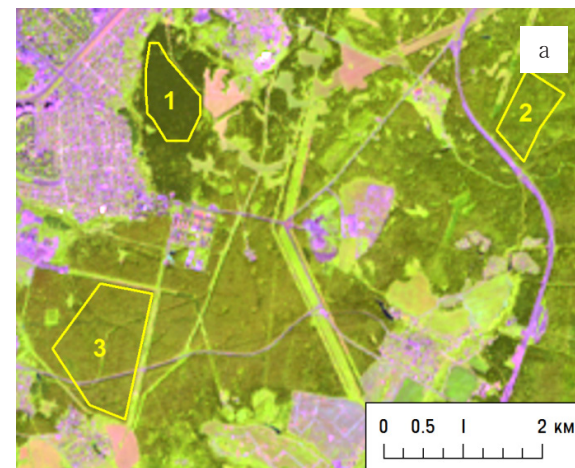


Рис. 3.5.2. Ареалы темнохвойного леса (1), смешанного елово-березового леса (2) и елово-липового леса (3) на снимке Landsat-8 летнего периода в синтезе SWIR-NIR-RED (а) и в синтезе NIR-RED-GREEN (б)

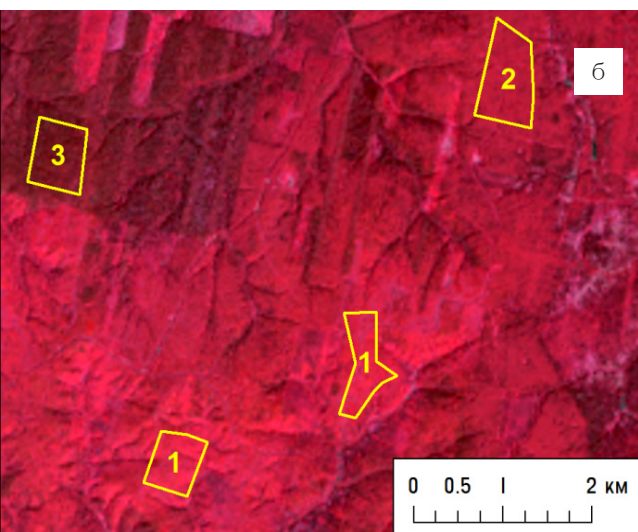
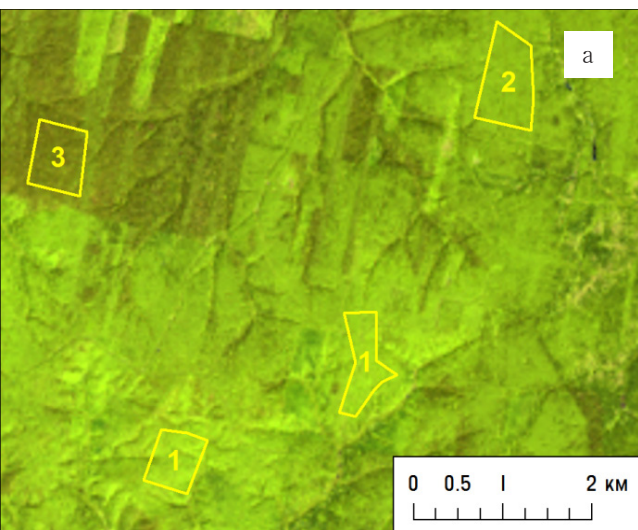


Рис. 3.5.3. Ареалы мелколистственного леса (1), смешанного леса с преобладанием лиственных пород (2) и смешанного леса с преобладанием темнохвойных пород (3) на снимке Landsat-8 летнего периода в синтезе SWIR-NIR-RED (а), и в синтезе NIR-RED-GREEN (б)

Сезонные дешифровочные признаки для определения лесообразующих пород деревьев

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).

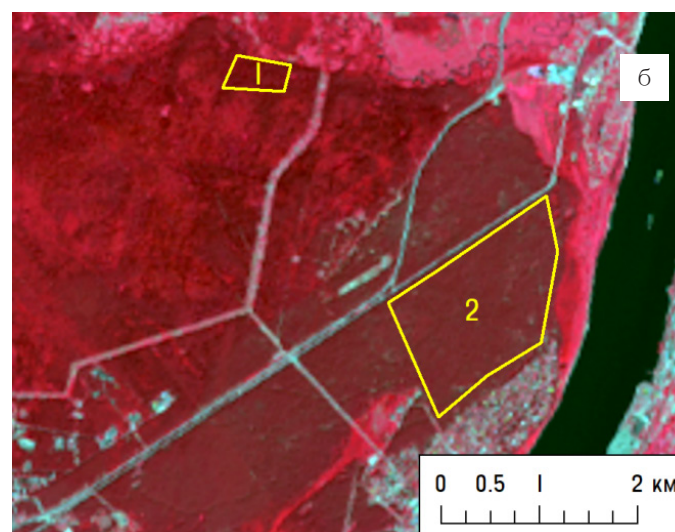
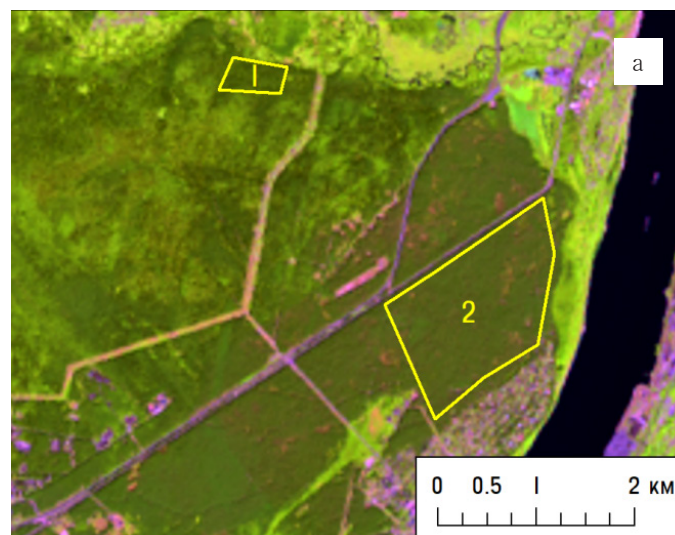


Рис. 3.5.4. Участок соснового леса (1) и темнохвойного леса (2) на снимке Landsat-8 летнего периода в синтезе SWIR-NIR-RED (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

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 (рис. 3.5.5, а).

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

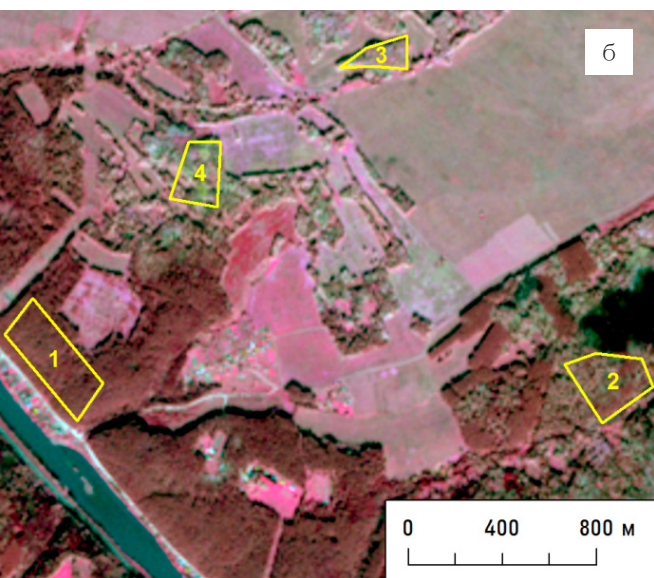
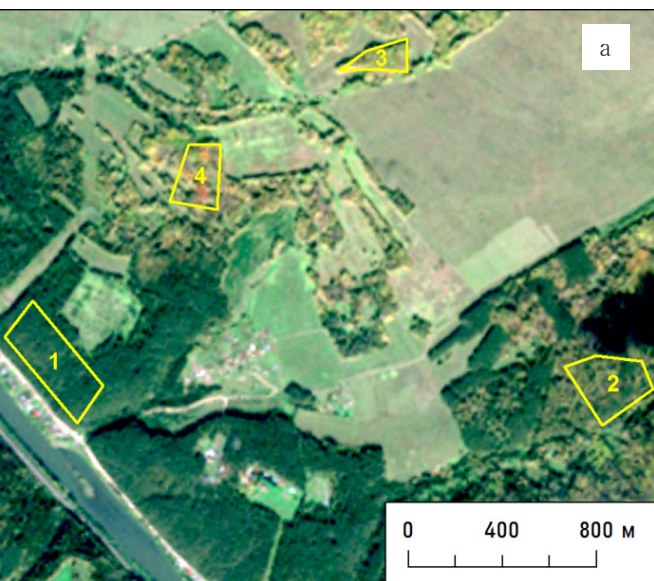


Рис. 3.5.5. Участки соснового леса (1), сосново-березового леса (2), березового леса (3) и осинника (4) на снимке Sentinel-2, полученном в осенний период (середина сентября) в синтезе каналов «естественные цвета» (а) и в синтезе NIR-RED-GREEN (б)

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 (рис. 3.5.5, б). 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.

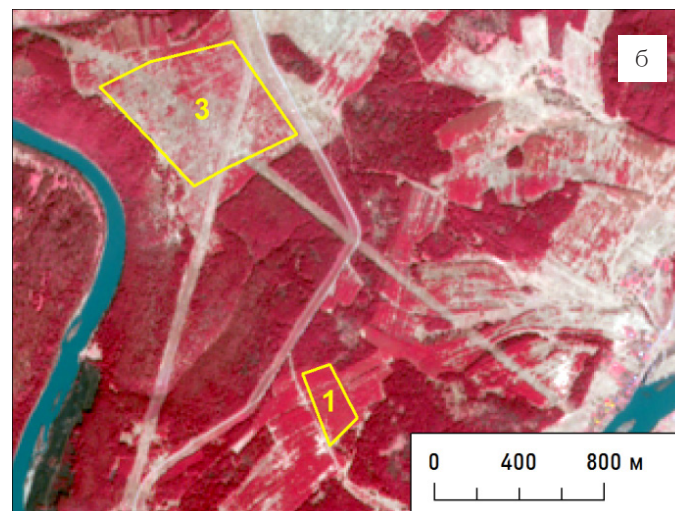
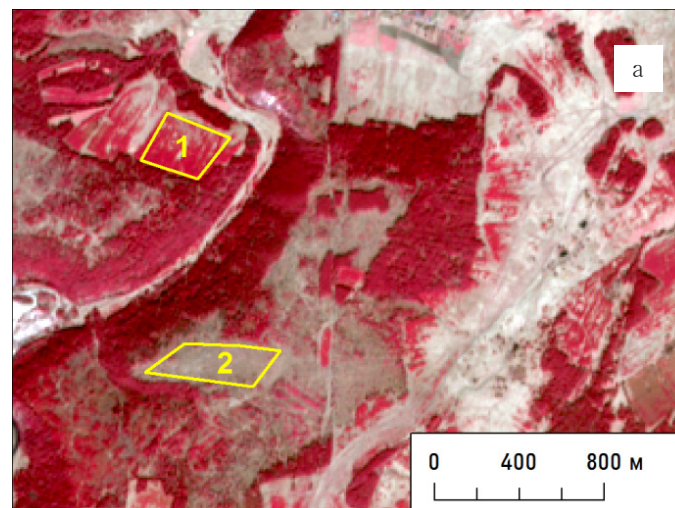


Рис. 3.5.6. Молодняки с преобладанием хвойных пород (1), лиственных пород (2) и смешанные молодняки (3) на зарастающих полях, на двух фрагментах (а и б) снимка Sentinel-2, полученного в весенний период (середина мая) в синтезе каналов NIR-RED-GREEN

Снимки, полученные в весенний период (после схода снежного покрова и до начала вегетационного периода) наиболее полезны для оценки доли хвойных пород в насаждениях (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 (рис. 3.5.6). 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.

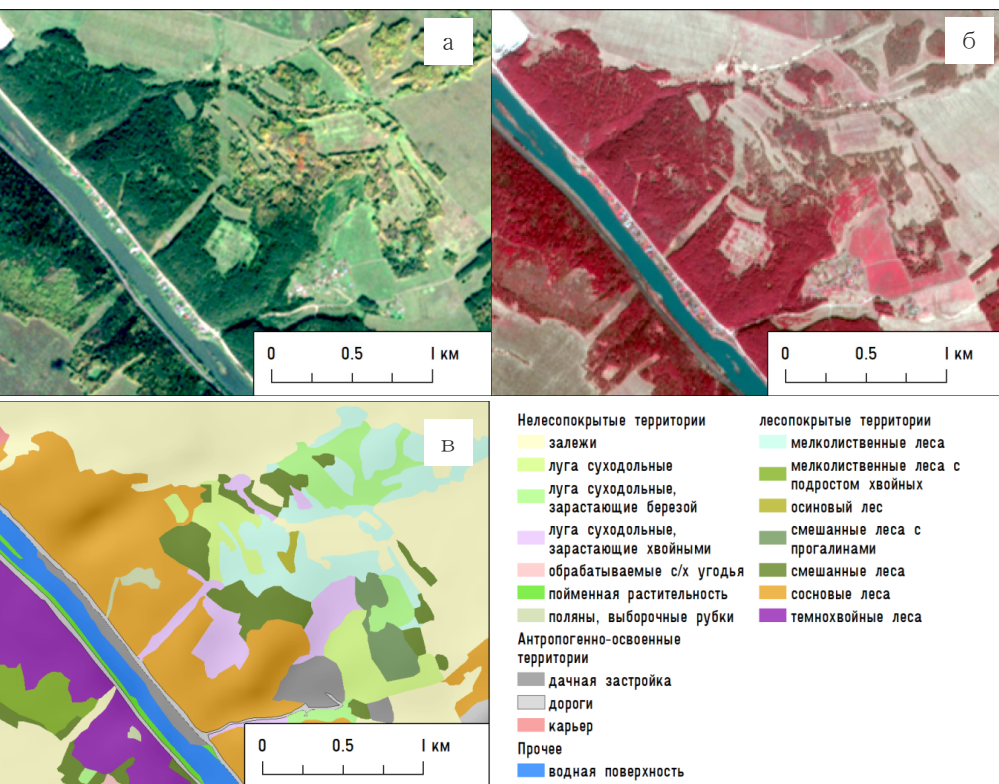


Рис. 3.5.7. Осенний снимок Sentinel-2 в синтезе естественных цветов (а), весенний снимок Sentinel-2 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN (б) и полученная на их основе схема контурного дешифрирования земельных угодий (в)

Наиболее эффективным для визуального (а иногда и для автоматизированного) дешифрирования является совместное использование нескольких снимков, полученных в разные сезоны года. На рис. 3.5.7. приведен пример составления схемы дешифрирования земельных угодий на основе двух снимков Sentinel-2A, полученных в мае и в сентябре для того же участка территории, который показан на рис. 3.5.5.

Наиболее распространенной лесообразующей породой в России является лиственница. Лиственничные леса занимают обширные площади в районах с резко континентальным климатом, в первую очередь в Центральной Сибири и в Якутии, однако встречаются и в более западных районах (в том числе как искусственные посадки). Наиболее очевидным дешифровочным признаком лиственницы является пожелтение хвои в осенний период, что позволяет надежно отделять лиственничники от других типов хвойных лесов по осенним снимкам, в том числе в синтезе естественных цветов. Пожелтение и сброс хвои лиственницей происходит несколько позже, чем например листьев у березы, что может служить дешифровочным признаком для отделения лиственничников от мелколиственных лесов. Пример сентябрьского снимка лиственничного леса в синтезе естественных цветов приведен на рис. 3.5.8.

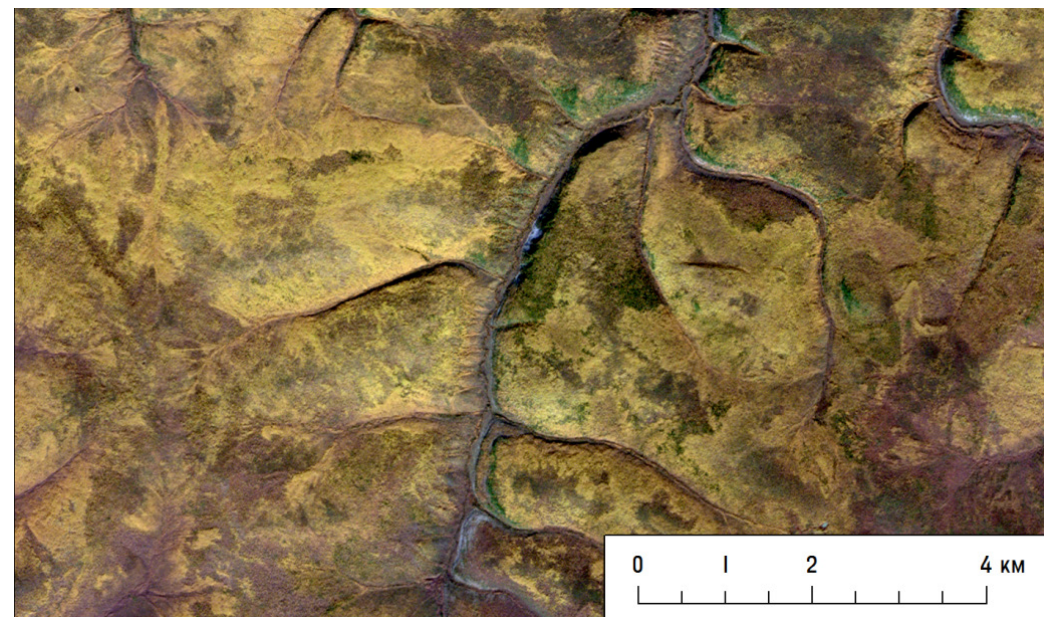


Рис. 3.5.8. Лиственничные леса (Центральная Якутия) на осеннем снимке Sentinel-2 в синтезе каналов «естественные цвета»

Дешифровочные признаки насаждений разного возраста

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 водоохранных зонах (рис. 3.5.9).

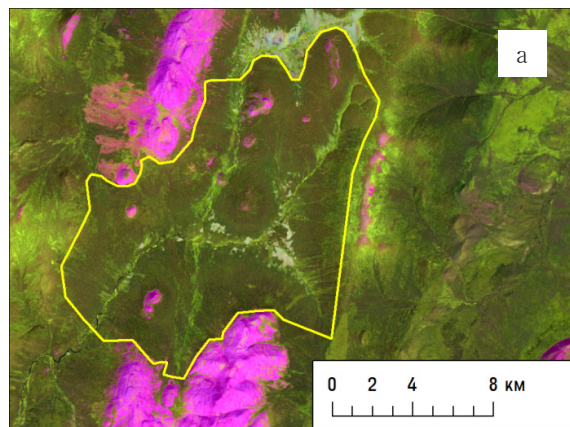
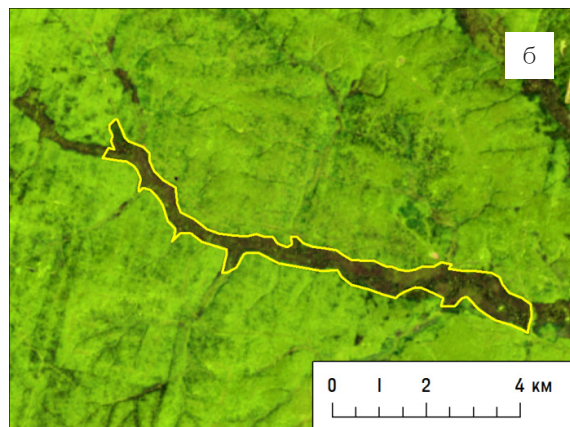


Рис. 3.5.9. Крупный массив первичных темнохвойных лесов в горах Северного Урала (а) и сохранившийся участок первичных лесов (в окружении вторичных) в водоохранной зоне (б) на снимке Landsat-8 летнего сезона, синтез каналов SWIR-NIR-RED



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 (рис. 3.5.10, а). 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 (рис. 3.5.10, б). Спектральные признаки преобладающих древесных пород для первичных и вторичных лесов в целом одинаковы.

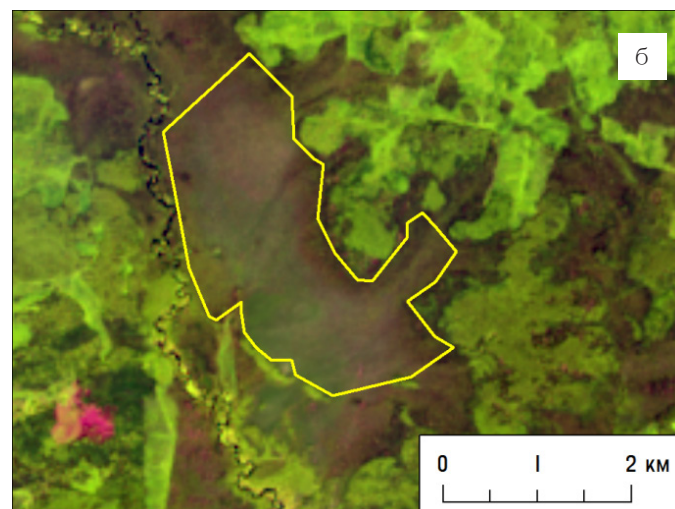


Рис. 3.5.10. Первичные смешанные и мелколиственные леса в горах Северного Урала (а) и первичные сосновые заболоченные леса (б) на снимке Landsat-8 летнего сезона, синтез каналов SWIR-NIR-RED

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 (рис. 3.5.11). Также для районов с преобладанием вторичных лесов характерна ситуация, когда на водораздельных участках распространены смешанные и мелколиственные вторичные леса, а в водоохранных 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.



Рис. 3.5.11. Вторичные леса, восстанавливающиеся после вырубок: с преобладанием темнохвойных пород (1), смешанные темнохвойно-мелколиственные (2) и мелколиственные (3) на снимке Landsat-8 летнего сезона, синтез каналов SWIR-NIR-RED

На труднодоступных территориях, где лесозаготовка ведется в ограниченных объемах, также встречаются крупные массивы вторичных лесов, восстанавливающихся после пожаров или после ветровалов (рис. 3.5.12). 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.

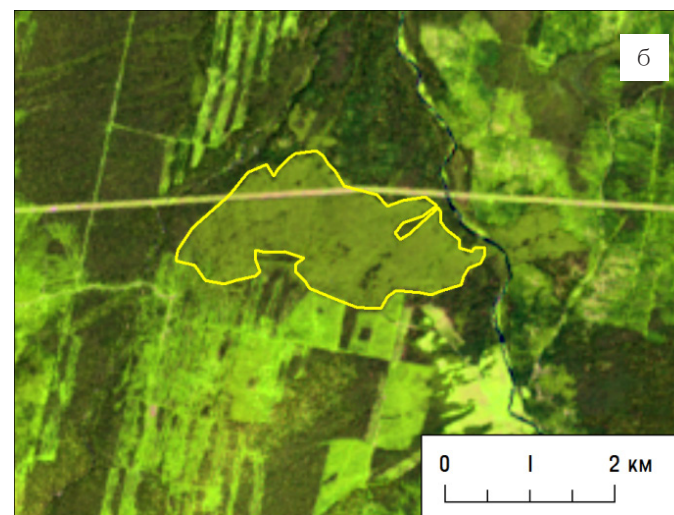
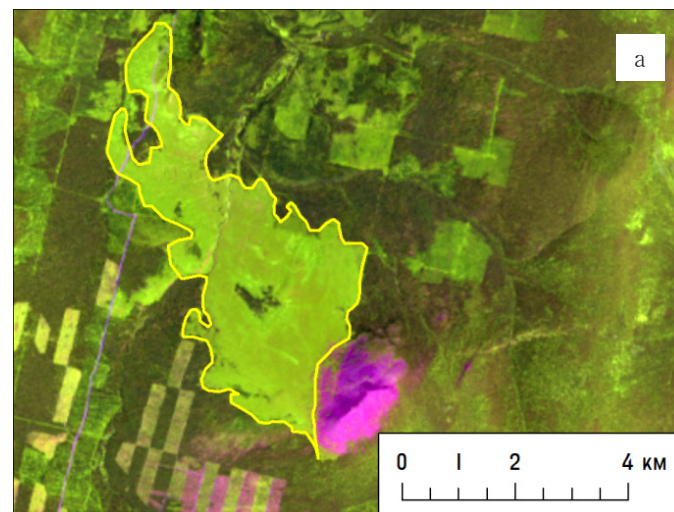


Рис. 3.5.12. Вторичные леса, восстанавливающиеся на местах пожаров: а) возраст гари 25 лет, б) возраст гари оценочно около 50 лет, на снимке Landsat-8 летнего сезона, синтез каналов SWIR-NIR-RED

3.6. Лесохозяйственная деятельность

Основные дешифровочные признаки рубок

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 [19]. 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, PlanetScope 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.

Дешифровочные признаки сплошных, выборочных и проходных рубок

Наиболее распространенным способом рубок в лесной хозяйстве России являются сплошные рубки, при которых происходит полное изъятие древостоя или сохраняются отдельные деревья. Дешифрирование сплошных рубок не представляет затруднений по причине сильного контраста яркости в сравнении с лесными массивами. В синтезе каналов NIR-RED-GREEN свежие сплошные вырубки будут иметь голубовато-зеленый оттенок (рис. 3.6.1, а), а в синтезе SWIR-NIR-RED – ярко-розовый (рис. 3.6.1, б). Это позволяет надежно отделить их от зарастающих вырубок, которые имеют ярко-зеленый цвет в синтезе каналов SWIR-NIR-RED за счет восстановления растительного покрова.

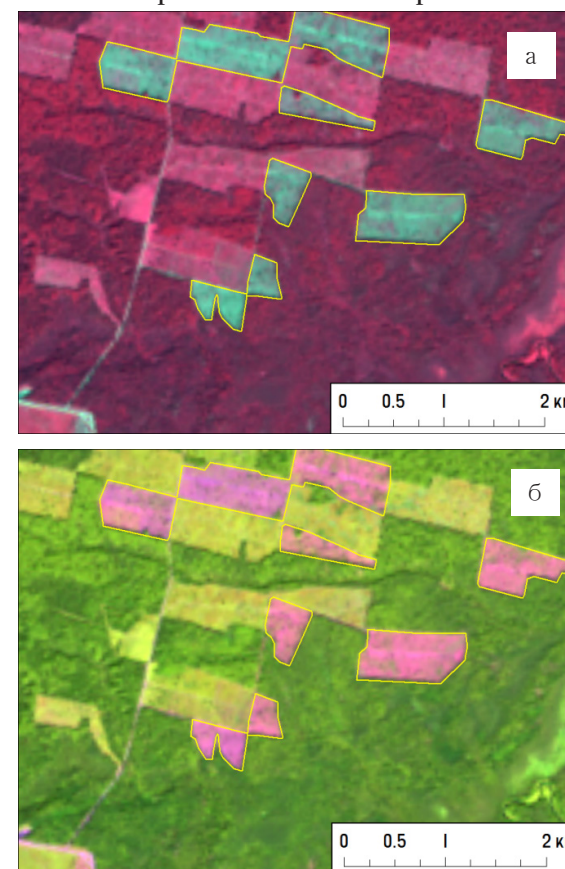


Рис. 3.6.1. Сплошные свежие и зарастающие вырубки на снимке Landsat-8, полученном в летний период, в синтезе NIR-RED-GREEN (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Важнейшим геометрическим признаком вырубок является наличие прямых углов (часто – вообще прямоугольная форма), причем это более характерно для сплошных вырубок, чем для

проходных и выборочных. На участках интенсивной лесозаготовки обычно в шахматном порядке расположены свежие, зарастающие вырубki и сохранившиеся лесные участки (рис. 3.6.1). Это обусловлено так называемыми сроками примыкания, т.е. запретом на проведение вырубki леса, примыкающего к сплошной вырубке, в течение нескольких лет. Соблюдение сроков примыкания необходимо для сохранения почвенного покрова и обеспечения лесовосстановления.

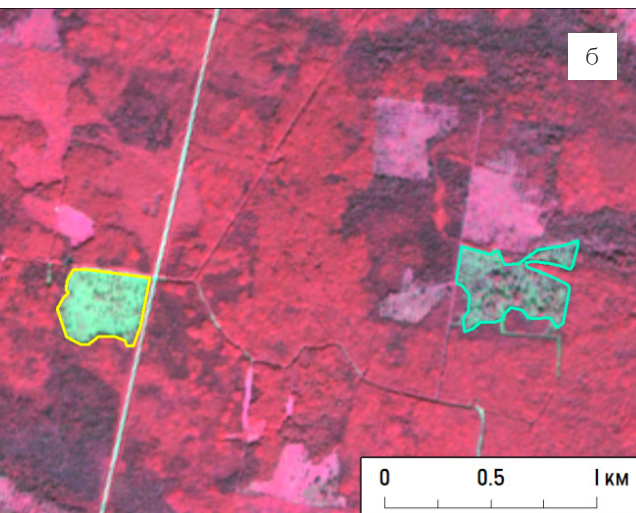
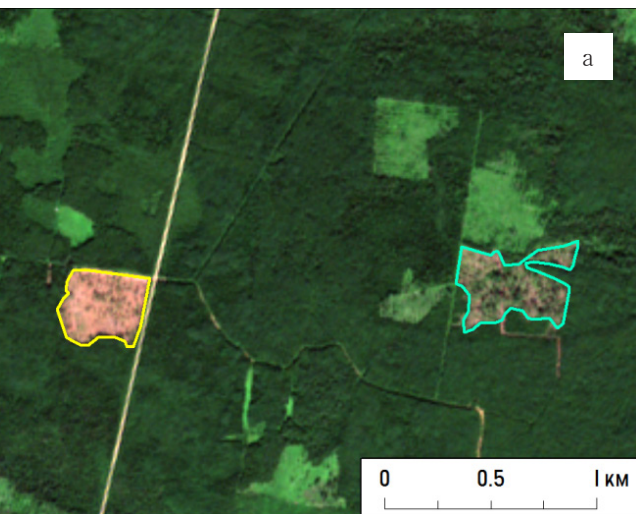


Рис. 3.6.2. Сплошная (желтый контур) и проходная (голубой контур) рубка на снимке Sentinel-2 в естественных цветах (а) и в синтезе NIR-RED-GREEN (б)

Для обнаружения проходных и особенно выборочных рубок леса пространственное разрешение снимков Landsat (30 м) недостаточно. Проходные рубки могут быть выявлены по спектральным

признакам, которые выражены хуже, чем для сплошных рубок, а выборочные рубки, как правило, не обнаруживаются. При использовании снимков высокого разрешения (от 10 м) тип рубки определяется по рисунку изображения (рис. 3.6.2, 3.6.3). При этом для успешного выявления выборочных рубок необходимо пространственное разрешение данных от 5 м и детальнее.

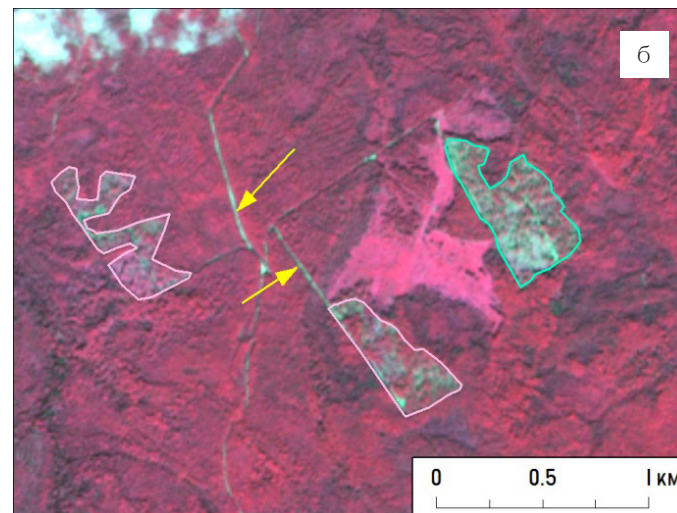
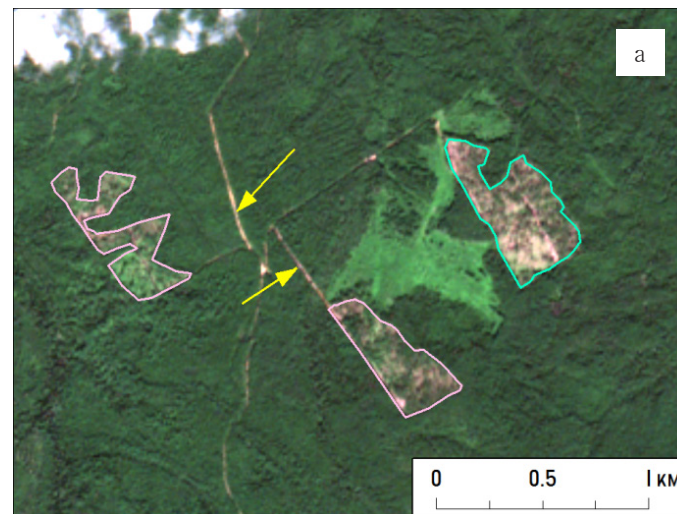


Рис. 3.6.3. Проходная (голубой контур) и выборочные (розовый контур) рубки на снимке Sentinel-2 в естественных цветах (а) и в синтезе NIR-RED-GREEN (б). Желтыми стрелками показаны подъездные пути

Выделение вырубок по разновременным снимкам летнего и зимнего периода

Для мониторинга вырубок используются временные серии снимков среднего и высокого разрешения. Эффективность дешифрирования и возможность его автоматизации в значительной степени зависит от сезона съемки. Наиболее успешно вырубки дешифрируются по разновременным зимним снимкам (особенно полученным в марте). Это связано с очень значительным контрастом в спектральной яркости между лесопокрытыми и безлесными участками при наличии снежного покрова (в красной зоне спектра).

Наиболее информативным для выделения вырубок по снимкам, полученным в течение вегетационного периода, является мультिवременной синтез на основе среднего ИК канала. По такому изображению можно выделить не только сплошные, но и проходные, и часть выборочных рубок.

На мультिवременном изображении, синтезированном из красных каналов двух зимних снимков, полученных с разницей по времени в один год, очень хорошо видны не только сплошные, но и проходные рубки (рис. 3.6.4, а). Если при составлении мультिवременного изображения в красный слот добавить красный канал «нового» снимка, а в синий и в зеленый слот – соответствующий канал «старого» снимка, то все вырубки, появившиеся за период между получением двух снимков, будут иметь красный оттенок. При этом все старые вырубки останутся белыми. Красный цвет свежих вырубок обусловлен резким увеличением яркости по новому снимку (который отображается в красном слоте) в сравнении со старым снимком. Этот прием эффективен и для выявления других нарушений лесного покрова.

Лесовосстановление на вырубках

Оценка лесовосстановления на вырубках по спутниковым снимкам в целом представляет более сложную задачу, чем мониторинг самих вырубок. По снимкам вегетационного периода не всегда возможно надежно отличить травянистую растительность от восстанавливающегося лиственного леса в первые 5-10 лет после вырубки (рис. 3.6.5). На летних снимках в первые годы после вырубок наблюдается рост отражательной способности в ближнем ИК диапазоне в связи с ростом содержания хлорофилла, и ее снижение в красном и среднем ИК каналах, в связи с уменьшением площади открытого грунта. Однако интенсивность этого процесса может быть различной. При зарастании вырубки хвойными деревьями яркость в ближнем ИК диапазоне увеличивается значительно менее интенсивно.

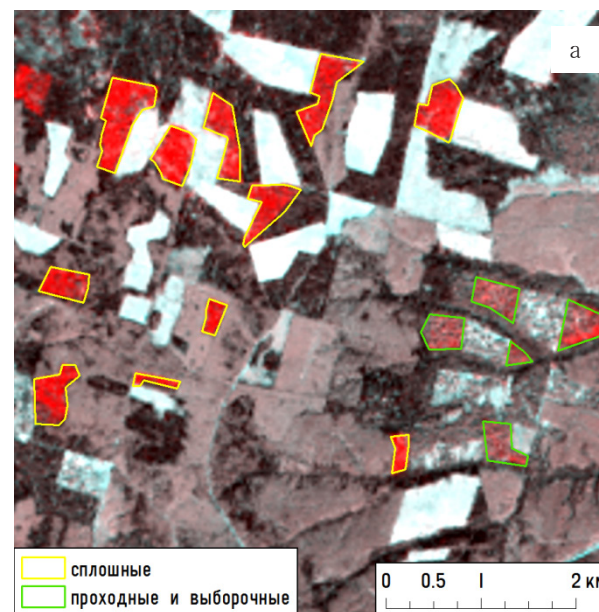
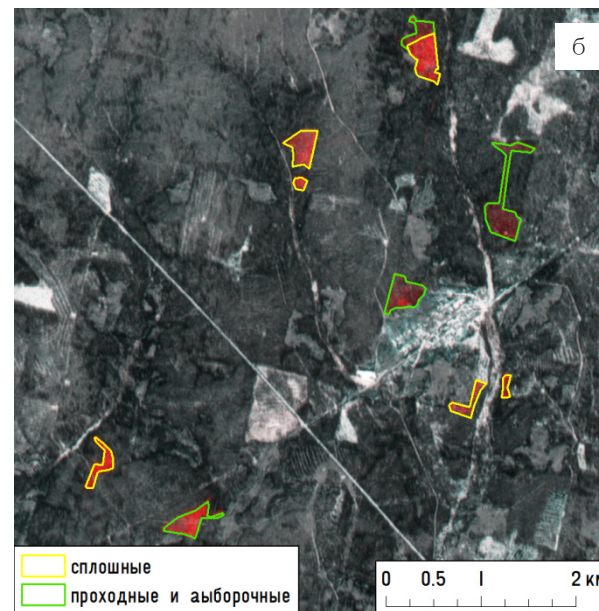


Рис. 3.6.4. Свежие сплошные и выборочные рубки на мультिवременных композитных изображениях: а) на основе красного канала двух снимков зимнего сезона, б) на основе среднего ИК канала двух снимков летнего сезона.



В обоих случаях свежие рубки, (появившиеся в период между получением первого и второго снимков) отображаются оттенками красного цвета

Весьма полезными могут быть снимки зимнего периода, особенно полученные в марте. Однако на первой стадии лесовосстановления (до 10 лет) лиственные молодняки могут быть не

видны вовсе (рис. 3.6.6), т.к. зимой их влияние на спектральные характеристики поверхности, покрытой снегом, будет незначительным. Хвойные молодняки будут видны на снимке, начиная с пионерных стадий лесовосстановления. Таким образом, по зимним снимкам возможно классифицировать восстанавливающиеся леса на преимущественно лиственные и хвойные. В синтезе каналов SWIR-NIR-RED на зимнем снимке хвойные молодняки будут иметь зеленоватый оттенок, а лиственные – красновато-коричневый (рис. 3.6.7).

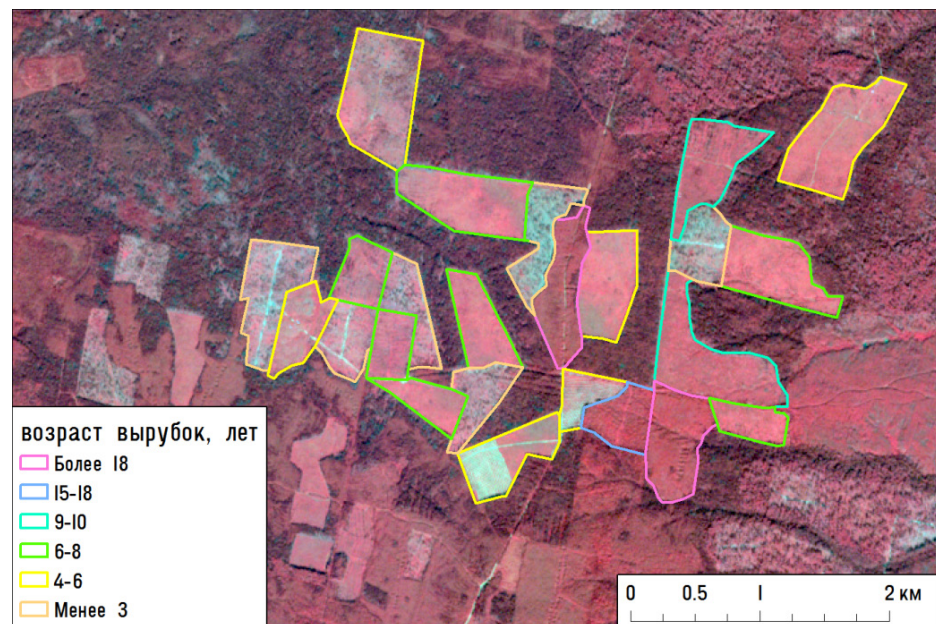


Рис. 3.6.5. Зарастающие разновозрастные вырубок на летнем снимке Sentinel-2 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN

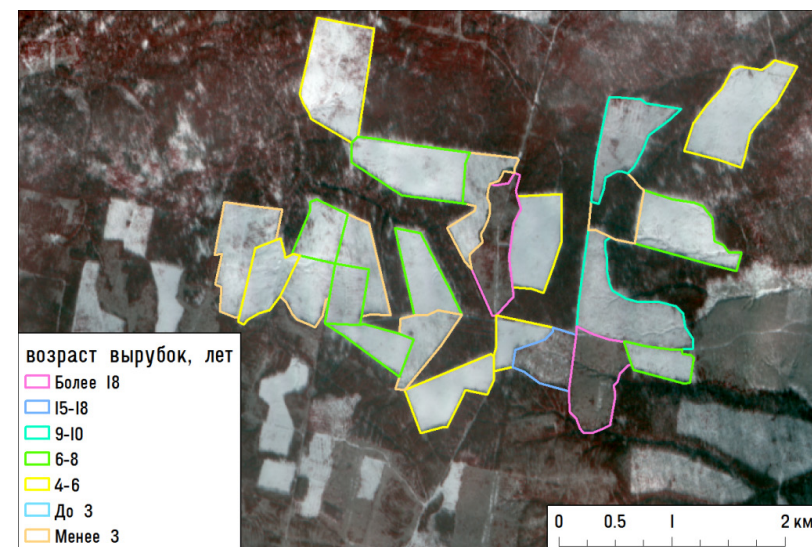


Рис. 3.6.6. Зарастающие разновозрастных вырубок на зимнем снимке Sentinel-2 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN

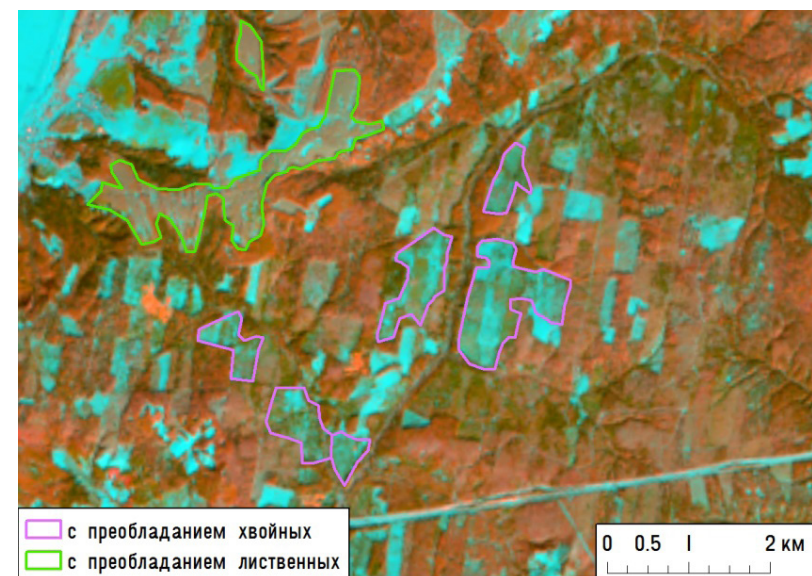


Рис. 3.6.7 Восстановление лесных насаждений различного породного состава на местах старых вырубок и сельхозугодий. Снимок Landsat-8 зимнего сезона, синтез SWIR-NIR-RED

3.7. НАРУШЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА, ВЫЗВАННЫЕ ПРИРОДНЫМИ ФАКТОРАМИ

Ежегодно значительные площади лесов России подвергаются воздействию неблагоприятных природных факторов: пожаров, ветровалов, снеголомов, гололеда, а также вспышек массового размножения вредителей и болезней леса. Все эти факторы приводят к полной гибели или частичному усыханию насаждений. Согласно данным [28], более 65% всей площади нарушений лесного покрова в России вызывается пожарами, около 30% – лесозаготовкой, а на остальные факторы приходится около 5%.

Как отмечено в предыдущем разделе, нарушения лесного покрова, вызванные лесозаготовками и природными факторами, имеют сходные спектральные характеристики. Однако гари, ветровалы и участки усыхания лесов имеют устойчивые отличительные признаки, которые позволяют надежно отделять их от вырубок.

Лесные пожары и их последствия

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 (зола) 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. 3.7.1, а). В синтезе SWIR-NIR-RED гари будут иметь темно-розовый оттенок – более темный, чем у вырубок (рис. 3.7.1, б). Но все же основным дешифровочным

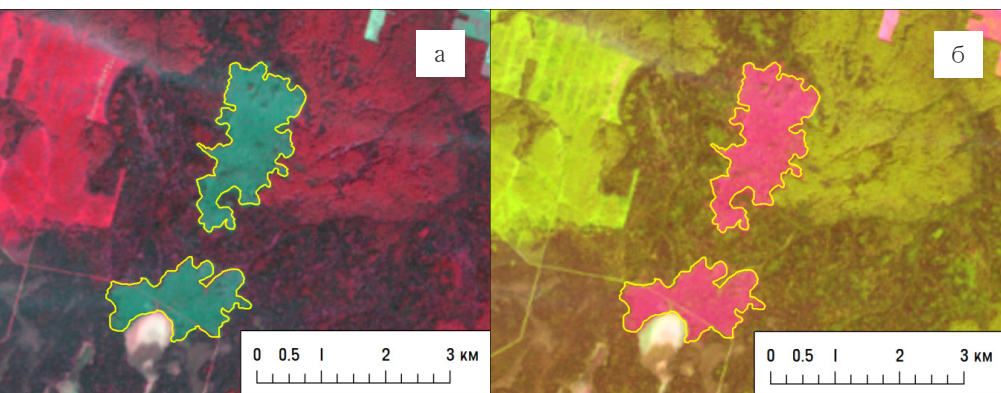


Рис. 3.7.1. Гари от пожаров лета 2010 г. в Пермском крае на снимке Landsat-8, полученном в летний период, в синтезе NIR-RED-GREEN (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

признаком, позволяющим отделить гари от вырубок, является геометрическая форма. Гари обычно имеют сложную форму и 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.

Существует возможность разделить гари, 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. 3.7.2, а приведен фрагмент снимка гари 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. 3.7.2, 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. 3.7.3, а). В синтезе каналов SWIR-NIR-RED или SWIR2-NIR-RED при пространственном разрешении снимка 20-30 м хорошо выделяются фронты пожаров (рис. 3.7.3, 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 г.

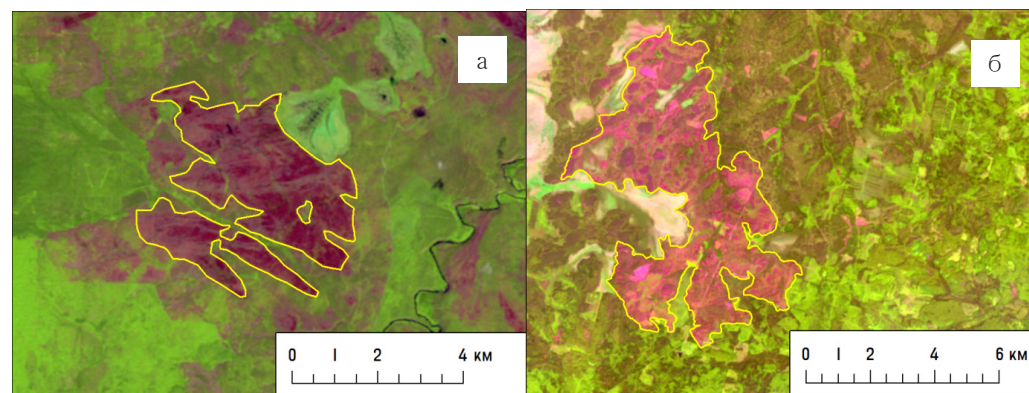


Рис. 3.7.2. Гари от верхового (а) и низового (б) пожаров летом 2010 г. на снимке Landsat-8 в синтезе SWIR-NIR-RED

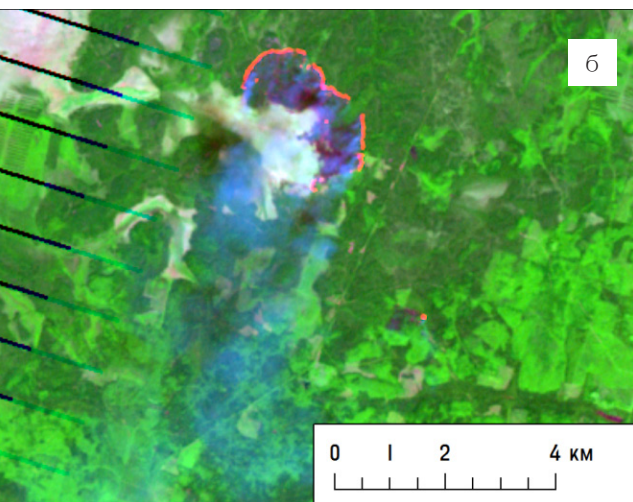
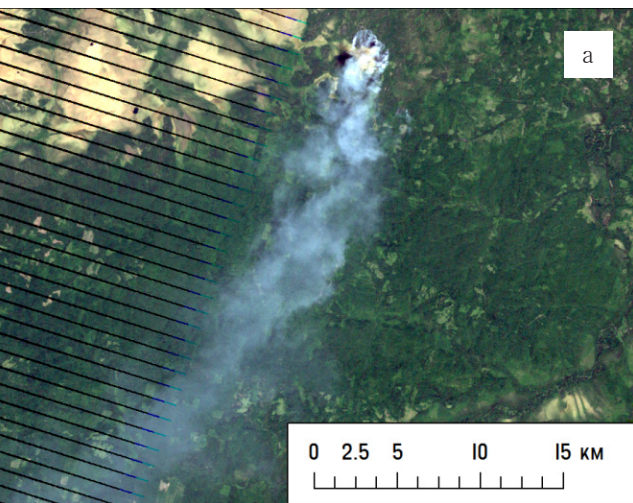


Рис. 3.7.3. Обнаружение действующего низового пожара по дымовому шлейфу на снимке Landsat-7 ETM+ в синтезе естественных цветов (а) и фронт этого пожара в синтезе SWIR2-NIR-RED (б)

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 ИК зоне за счет роста растительной биомассы, и некоторое его снижение в средней ИК зоне спектра, за счет уменьшения площади открытого грунта (рис. 3.7.4, а). 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 (рис. 3.7.4, б).

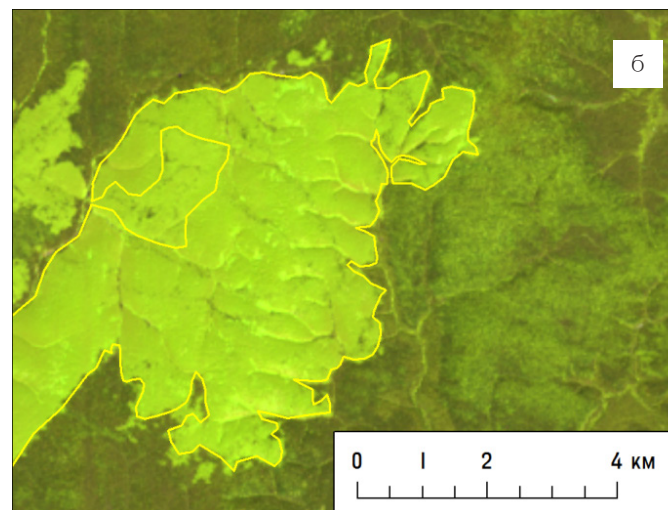
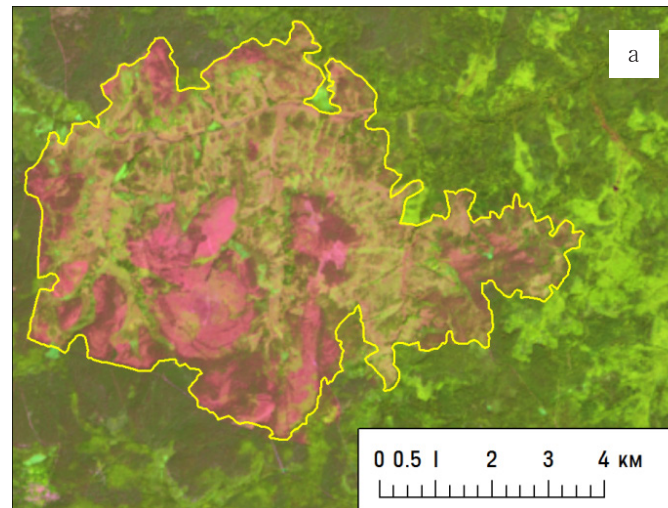


Рис. 3.7.4. Стадии лесовосстановления на гарях: пионерная стадия через 7 лет после пожара (а) и мелколиственный лес на гари через 25 лет после пожара (б). Снимок Landsat-8, синтез SWIR-NIR-RED

Ветровалы

В отличие от гарей, сплошные ветровалы имеют спектральные признаки, практически идентичные вырубкам. Проведенные исследования [27] показали невысокую точность (около 75%) их автоматизированного отделения от вырубок только по спектральным признакам. Так же, как и вырубки, ветровалы в синтезе каналов NIR-RED-GREEN будут иметь голубоватый оттенок (рис. 3.7.5, а), а в синтезе SWIR-NIR-RED отличаются розовым оттенком (рис. 3.7.5, б). Для дешифрирования можно использовать оба синтеза. Интенсивность оттенка пропорциональна степени повреждения лесного покрова.

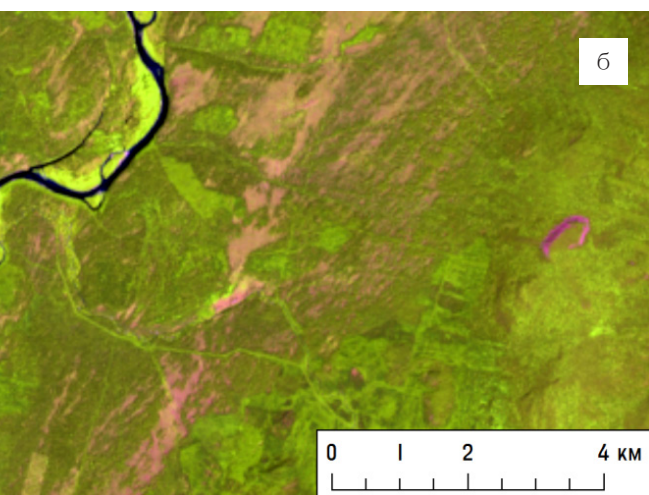
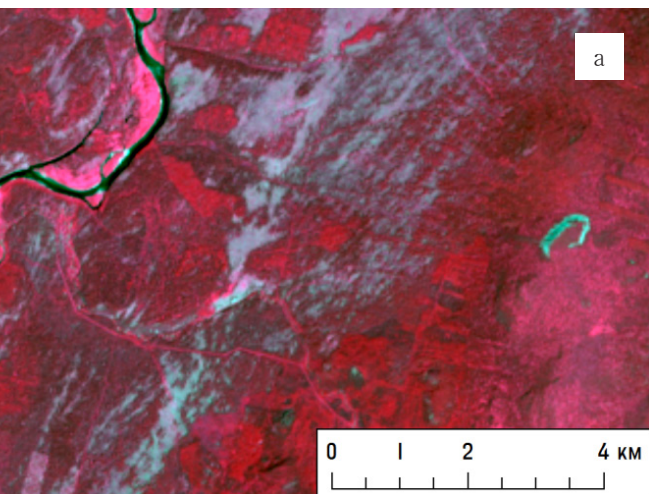


Рис. 3.7.5. Ветровал, вызванный шквалистым ветром (с веерным рисунком изображения) на летнем снимке Landsat-8 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Основным дешифровочным признаком ветровалов является *характерная форма*. Ветровалы, вызванные сильным шквалистым ветром, обычно имеют веерный рисунок изображения с полным отсутствием прямых углов, который позволяет надежно отличить их от вырубок (рис. 3.7.6, а). Ветровальные участки почти никогда не имеют прямых углов, за исключением тех случаев, когда границы ветровала соответствуют границам старых вырубок. Ветровалы особенно часто наблюдаются в перестойных темнохвойных лесах. При этом молодняки (леса, восстанавливающиеся после вырубок) почти не повреждаются ветром.

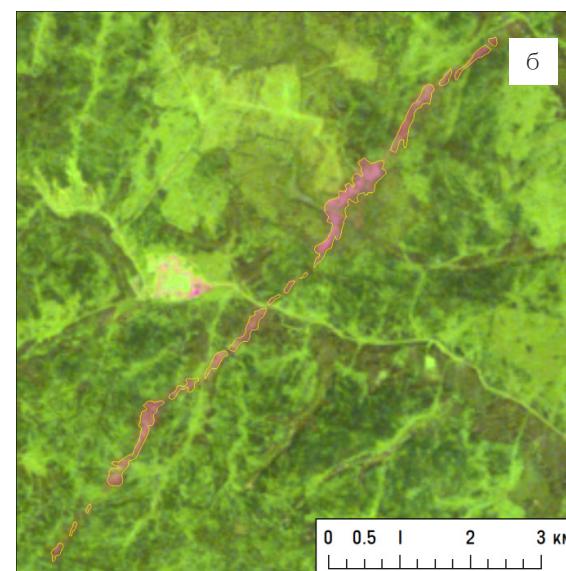
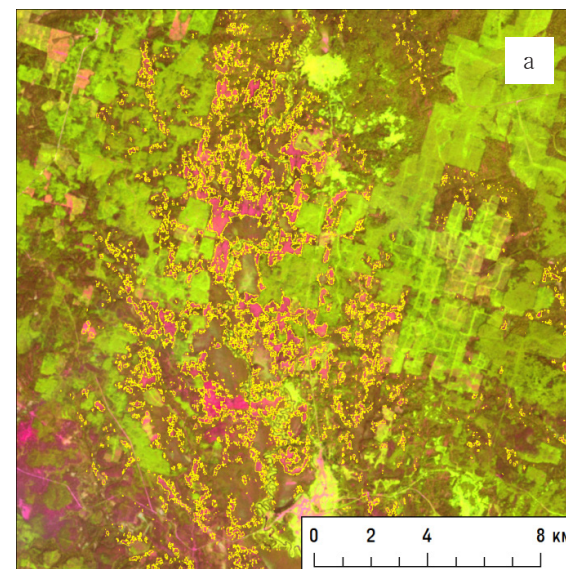


Рис. 3.7.6. Веерная (а) и линейная (б) формы ветровалов на снимке Landsat-8 в синтезе SWIR-NIR-RED. Ветровальные участки выделены желтым контуром

Помимо веерных ветровалов встречаются также линейные ветровалы, у которых протяженность превышает ширину более чем в 10 раз (рис. 3.7.6, б). Они вызываются смерчами, и как правило имеют сплошной характер [32]. Смерчевые ветровалы наблюдаются реже обычных веерных, так как сами смерчи случаются реже, чем сильные штормовые ветра.

Усыхание лесов

Помимо пожаров и ветровалов, гибель лесов может происходить и по иным причинам: в результате вспышек размножения вредителей, болезней леса, подтопления, заболачивания, вымывания, а также естественного распада насаждения. Все эти процессы особенно характерны для перестойных лесов. Однако Например, крупные участки усыхающих лесов имеются в центральной части Архангельской области [7].

В отличие от катастрофических нарушений (вызванных пожарами и ветровалами), усыхание является постепенным процессом и часто не приводит к полной гибели насаждения. Поэтому его дешифрирование оказывается несколько сложнее. Спектральные дешифровочные признаки усыхающих лесов в целом аналогичны другим типам нарушений лесного покрова. Отмечается рост яркости в среднем ИК канале и ее снижение в ближнем ИК, которые пропорциональны доле погибших деревьев. Также для усыхающих лесов характерна сложная мелкопятнистая текстура, поскольку они, как правило, представляют собой мелкоконтурную мозаику куртин усыхания (групп погибших деревьев) и сохранившихся участков древостоя. Куртины усыхания будут отличаться более высокой спектральной яркостью в среднем ИК диапазоне, а также в каналах видимого диапазона.

Таким образом, в синтезе NIR-RED-GREEN усыхающие леса будут иметь темно-красный оттенок со сложной текстурой и участками зеленоватого цвета там, где погибла большая часть деревьев (рис. 3.7.7, а). В синтезе SWIR-NIR-RED усыхание леса дешифрируются по красноватым участкам разной степени яркости и сложной формы на общем темно-зеленом фоне (рис. 3.7.7, б).

Повреждение лесов болезнями и вредителями

Одной из основных причин усыхания и гибели лесных насаждений, в основном хвойных пород, является повреждение вредителями и болезнями леса. В России наибольший ущерб связан со вспышками размножения короеда-типографа в еловых лесах Европейской части России и непарного шелкопряда в лесах Сибири. Насаждения, погибшие от воздействия этих вредителей, называют соответственно короедниками и шелкопрядами.

Крупная вспышка размножения короеда-типографа наблюдалась в лесах Московской и Смоленской областей после засухи летом 2010 г. Площадь сильно поврежденных и погибших еловых лесов составила несколько десятков тыс. га. Вспышка размножения непарного шелкопряда в лесах Красноярского края привела к гибели более 700 тыс. га лесов в 2016-2017 гг.

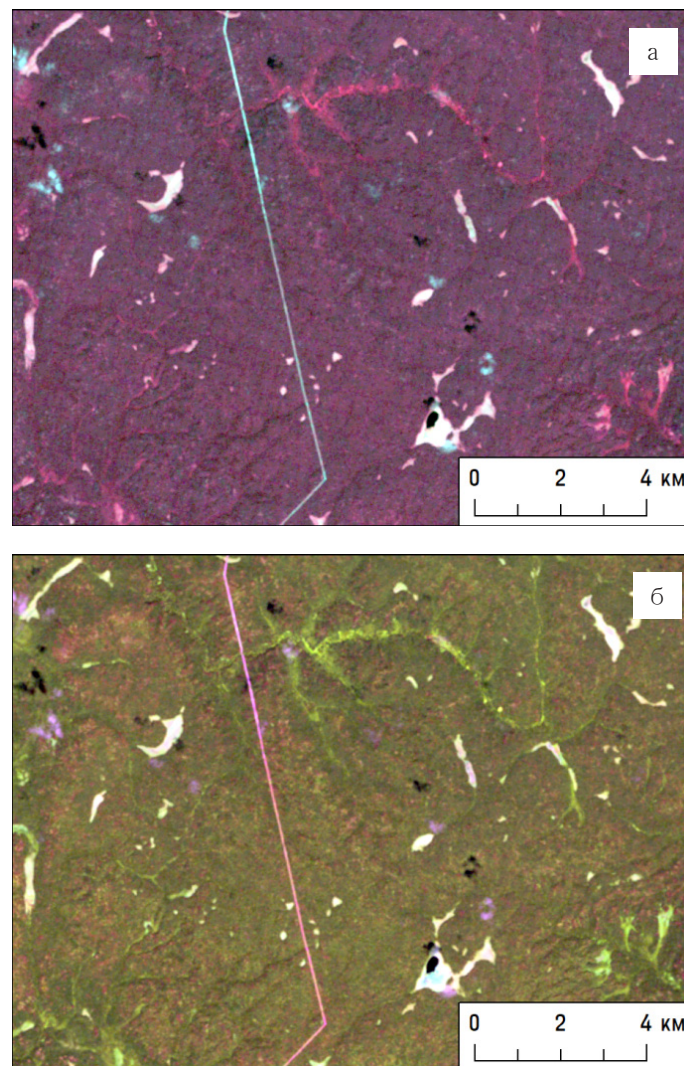


Рис. 3.7.7. Крупный массив усыхающих хвойных лесов на снимке Landsat-5 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

По спектральным признакам короедники и шелкопряды мало отличаются от других видов нарушений лесного покрова. Основными дешифровочными признаками является форма, рисунок изображения, а также очевидная приуроченность к участкам леса с преобладанием хвойных пород. Участки лесов, погибших от вспышек вредителей, имеют неправильную форму (в том случае, если они не ограничены рубками). Так, короедники обычно представлены множеством куртин усыхания различной площади, в этом смысле они схожи с ветровалами и снеголомами.

Основным отличительным признаком является текстура изображения.

После гибели леса образуется сухостой (происходит дефолиация), но шероховатая текстура изображения, характерная для леса, сохраняется (рис. 3.7.8). В этом состоит основное отличие от других видов нарушений лесного покрова, при которых текстура изображения сильно меняется в связи с удалением деревьев из древостоя (при вырубке или ветровале). Второй важной особенностью повреждения короедом является сравнительно медленная гибель деревьев, что позволяет отличить их от ветровалов и гарей на основе серии разновременных снимков.

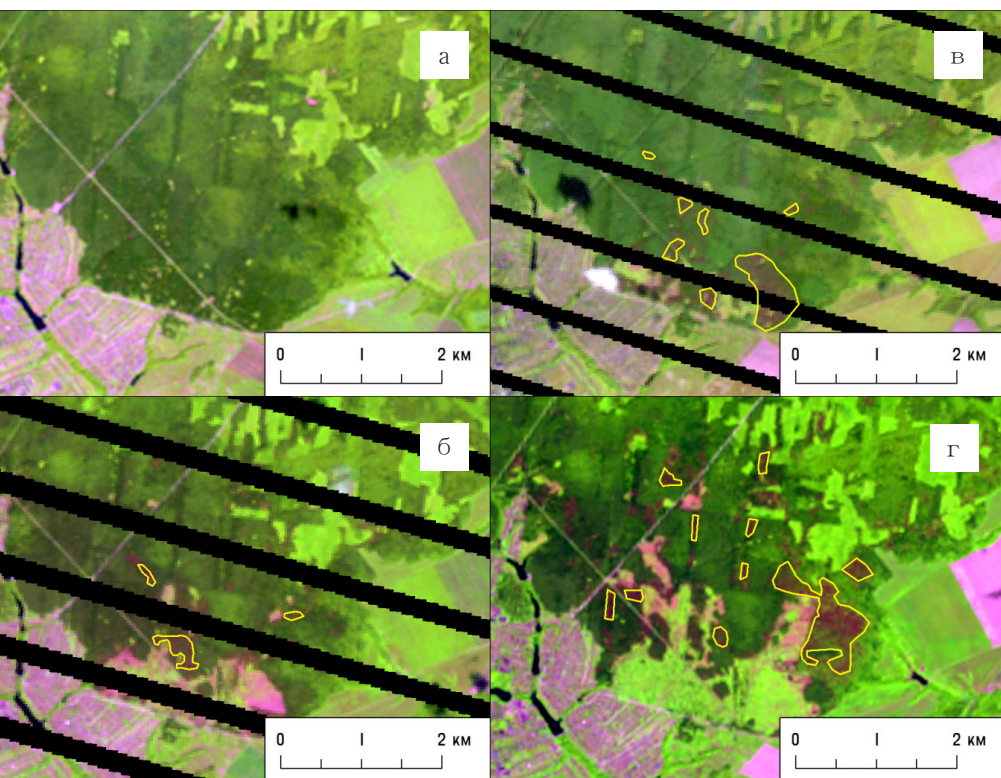


Рис. 3.7.8. Усыхание участков хвойного леса вследствие вспышки размножения короеда-типографа в Смоленской области по разновременным снимкам Landsat в синтезе SWIR-NIR-RED за 2010 (а), 2011 (б), 2012 (в) и 2013 (г) гг.

При вспышке размножения непарного (сибирского) шелкопряда дефолиация может происходить очень быстро (за несколько дней), поэтому визуально шелкопрядники очень похожи на гарь. Отличительной особенностью является приуроченность участков погибшего леса только к хвойным насаждениям (рис. 3.7.9). Для гарей это также характерно, но в меньшей степени. Проще всего отличить шелкопрядник от гарь, используя архивные спутниковые данные об активных лесных пожарах, например с сервиса FIRMS (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/active-fire-data>). Шелкопрядник будет отличаться от гарь тем, что в его пределах не будет многочисленных тепловых аномалий в период, когда произошло повреждение лесного покрова.



Рис. 3.7.9. Гибель крупного участка хвойного леса вследствие вспышки размножения непарного шелкопряда в Красноярском крае по разновременным снимкам Landsat в синтезе SWIR-NIR-RED за 2016 (а) и 2017 (б) гг.

Обнаружение нарушений лесного покрова по разновременным снимкам

Обычно мониторинг нарушений лесного покрова производится по серии последовательных снимков, полученным в течение вегетационного периода (до и после события). При использовании летних снимков наиболее информативен средний ИК канал, поэтому для выделения свежих гарей и ветровалов создают мультिवременные композиты на основе этого канала (рис. 3.7.10, а, б). В зависимости от порядка каналов в RGB-синтезе, можно отобразить нарушения лесного покрова в красных, зеленых или синих оттенках, но чаще используют красный оттенок.

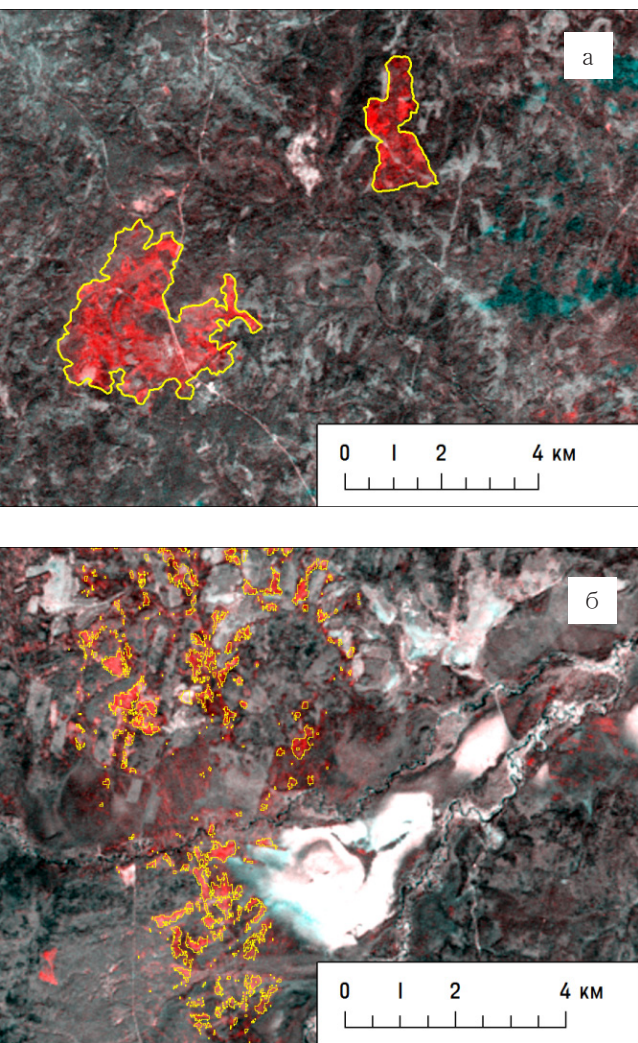


Рис. 3.7.10. Гари (а) и ветровалы (б) на мультिवременном композитном изображении из среднего ИК канала снимков Landsat, полученных в летний период

Также весьма информативными оказываются зимние снимки, полученные в феврале-марте, когда высота солнца уже позволяет минимизировать влияние теней. Зимние снимки особенно полезны для обнаружения ветровалов, произошедших в осенний период, которые часто не удается выявить ранее из-за значительной облачности. При выявлении нарушений лесного покрова по зимним снимкам наиболее информативен красный канал, поскольку яркость в нем (как и в других видимых каналах) резко увеличивается при появлении снежной поверхности вместо древесного полога. Мультिवременные изображения из двух разновременных снимков, полученных до и после нарушения лесного покрова, создаются также на основе красного канала (рис. 3.7.11).

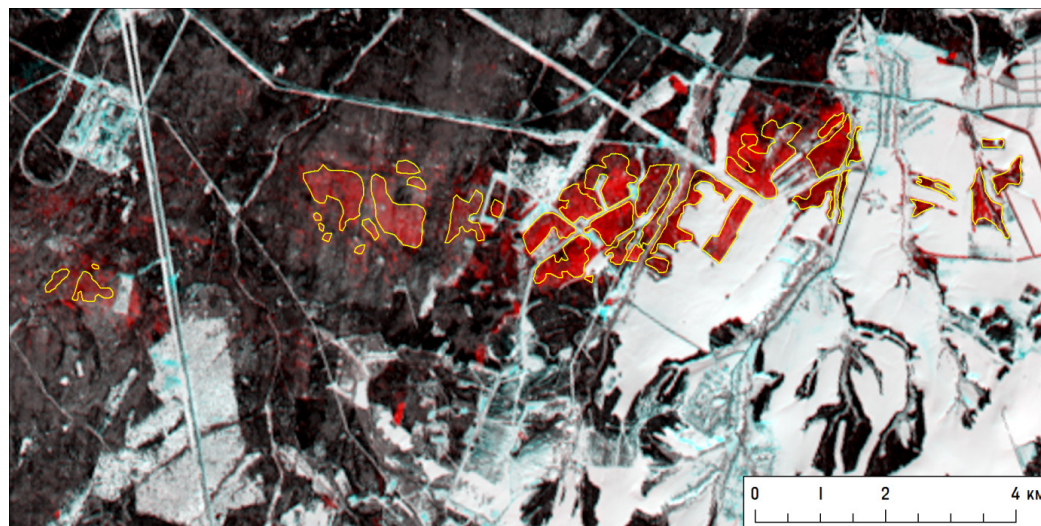


Рис. 3.7.11. Ветровал на мультिवременном композитном изображении из красного канала снимков Landsat, полученных в зимний период (контуры оцифрованы вручную)

На территории России естественные нелесные растительные сообщества наиболее широко распространены в арктическом и субарктическом поясе, где сохранились обширные площади земель, не нарушенных хозяйственной деятельностью. Здесь представлены арктические пустыни, различные виды тундр (мохово-лишайниковые, мохово-кустарничковые, кустарниковые, стланиковые, заболоченные и др.), а также болотные сообщества. В лесной зоне естественная нелесная растительность, главным образом, представлена интразональными сообществами, таким как обширные сфагновые болота и пойменные луга.

В свою очередь, в степной зоне естественная растительность сохранилась на сравнительно небольших участках, преимущественно в пределах особо охраняемых природных территорий. Большая часть территории лесостепной и степной зон распахана в настоящее время, была распахана в прошлом или имеет другие признаки хозяйственного освоения.

Растительность субарктического и арктического поясов

Каменистые арктические пустыни, отличающиеся практически полным отсутствием высшей растительности, распространены преимущественно на арктических островах и в горах арктической зоны. Их основным дешифровочным признаком является (как и у любых других участков, лишенных растительности) низкая яркость в ближнем ИК диапазоне и низкие значения вегетационного индекса NDVI. Спектральный образ формируется за счет свойств каменистой поверхности. В синтезе каналов NIR-RED-GREEN каменистые арктические пустыни могут иметь цвет от светло-серого до темно-серого (рис. 3.8.1, а). В синтезе SWIR-NIR-RED они преимущественно отображаются различными оттенками красного, т.к. имеют высокую яркость в среднем ИК диапазоне спектра (рис. 3.8.1, б). Такие же спектральные характеристики имеют и каменные россыпи (гольцы) в горах.

Тундровая растительность имеет разные спектральные признаки в зависимости от преобладающих видов, а также степени увлажнения. Значительная часть тундровой зоны заболочена, поэтому существенным фактором, влияющим на свойства растительного покрова, является степень дренирования территории. На рис. 3.8.1, б видно, что плохо дренируемые водораздельные участки тундры в синтезе каналов SWIR-NIR-RED имеют желтоватый оттенок, соответствующий преобладанию мохового и лишайни-

кового покрова, а хорошо дренируемые участки вдоль русел водотоков имеют более зеленый цвет, что указывает на распространение травянистых растений или карликовой березы.

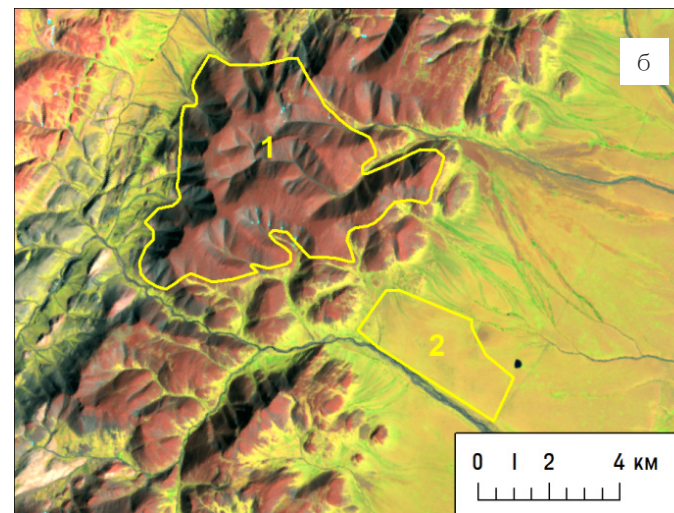
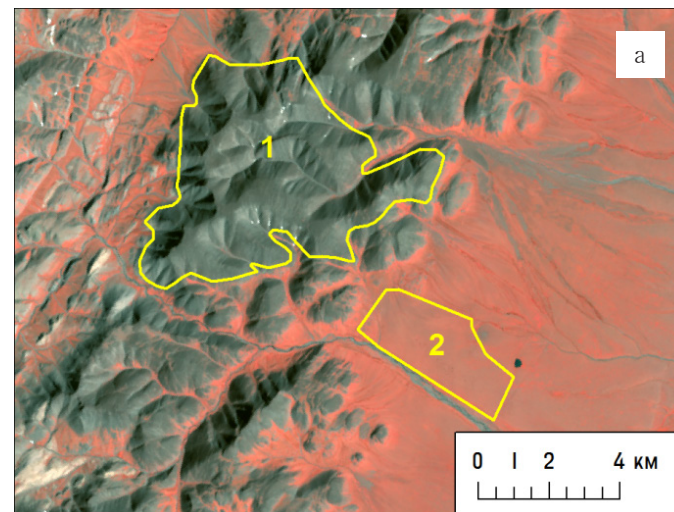


Рис. 3.8.1.
Каменистая горная арктическая пустыня (1) и мохово-кустарничковая тундра (2) на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Хорошо дешифрируются по летним снимкам стланиковые тундры, за счет темно-зеленого цвета в синтезе каналов SWIR-NIR-RED (рис. 3.8.2, а). В синтезе каналов NIR-RED-GREEN они отличаются более темным красным оттенком, чем прилегающие участки тундр других типов (рис. 3.8.2, б). Стланиковые формы кедра или других темнохвойных пород имеют примерно те же дешифровочные признаки, что и молодняки этих пород, произрастающие в таежной зоне.

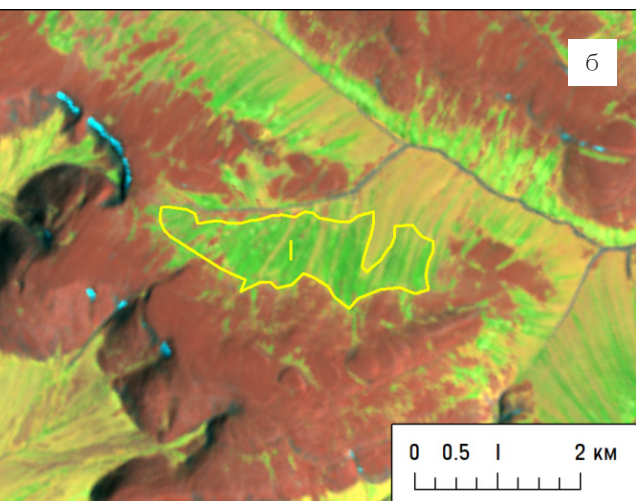
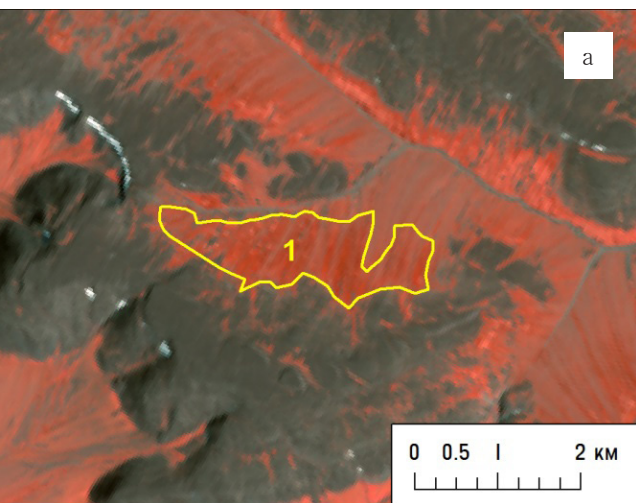


Рис. 3.8.2. Участок стланиковой тундры с преобладанием кедрового стланика (выделен контуром) на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

На плоских слабо дренируемых участках в тундровой зоне распространены заболоченные тундры и сфагновые болота. Они характеризуются выраженной мозаичностью растительного покрова, обусловленной локальными различиями условий увлажнения (рис. 3.8.3). На снимке в синтезе каналов SWIR-NIR-RED участки с преобладанием мхов отображаются оттенками желтого и оранжевого цветов. Ярко-зеленые цвета соответствуют преобладанию кустарничков и травянистых растений. Также характерной особенностью заболоченных тундр являются многочисленные мелководные озера, чаще всего термокарстового происхождения (рис. 3.8.3).

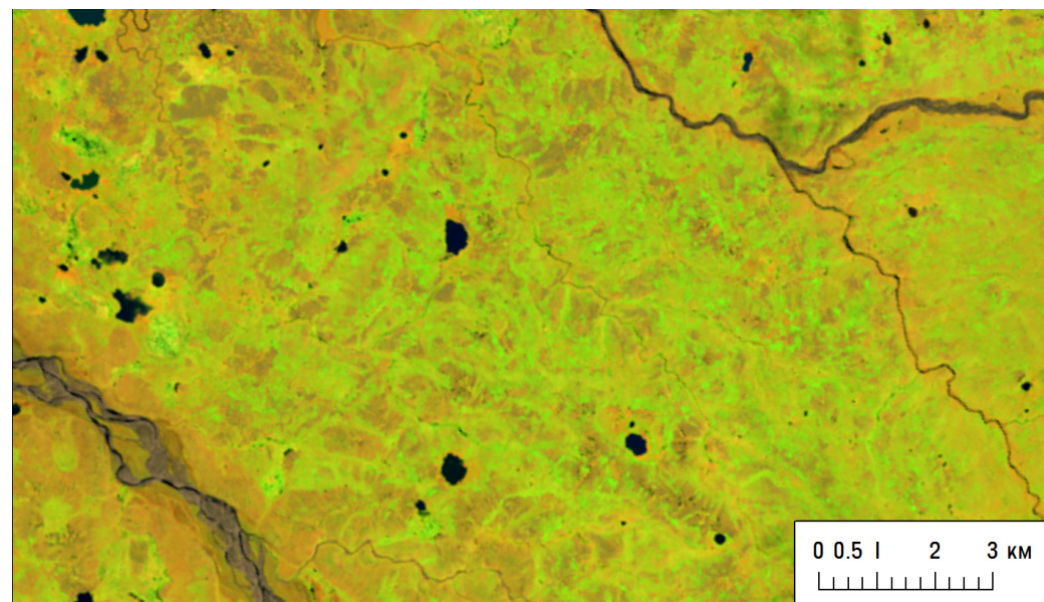


Рис. 3.8.3. Участок заболоченной тундры с термокарстовыми озерами на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN (а)

Естественная луговая растительность в лесной зоне

В лесной зоне естественные луга распространены в основном в поймах рек (пойменные луга). Суходольные луга, как правило, естественными не являются, т.к. в большинстве случаев лесная растительность на них не возобновляется только благодаря сенокосу или выпасу скота. Вблизи границы лесной и лесостепной зон возобновление лесной растительности уже может не происходить, в первую очередь на южных склонах. Также естественными являются горные субальпийские и альпийские луга, занимающие большие площади в горах выше границы леса при условии достаточного увлажнения.

Пойменные луга хорошо дешифрируются по летним снимкам. В синтезе каналов SWIR-NIR-RED они имеют яркий салатовый цвет, а в синтезе NIR-RED-GREEN – ярко-красный (рис. 3.8.4). В июне-июле пойменные луга имеют самую высокую яркость в ближнем ИК диапазоне и самый высокий NDVI среди всех природных объектов (около 0,8). Близкие значения NDVI имеют также посевы кормовых культур, однако естественные луга можно отличить по косвенным признакам – положению в поймах рек и отсутствию признаков возделывания земли (см. п. 3.9).

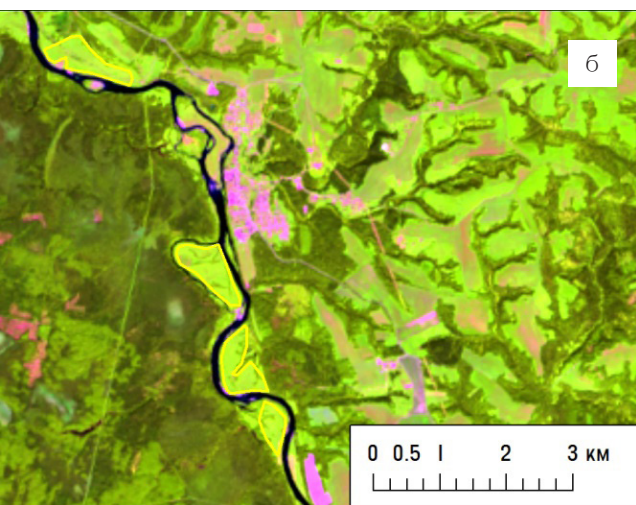
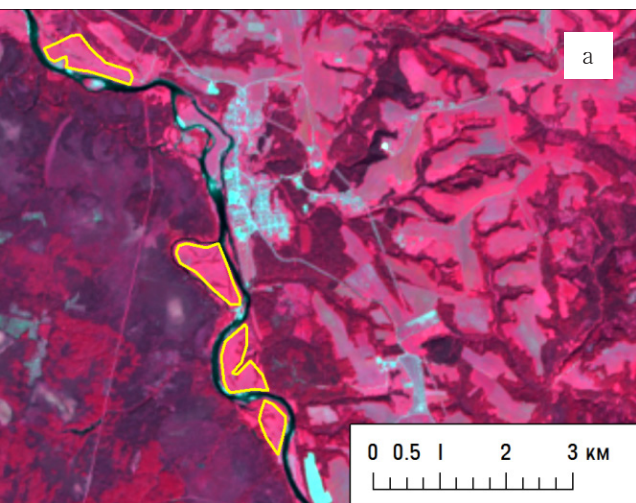


Рис. 3.8.4. Пойменный луг на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Растительность высотных поясов в горных районах

В горах Урала и в пределах ряда других горных систем, расположенных в лесной зоне, представлены три основных высотных пояса – горно-лесной (горно-таежный), подгольцовый и гольцовый. Подгольцовый пояс иногда также делят на субальпийский (луговой) и собственно подгольцовый. На рис. 3.8.5 представлены фрагменты снимка Landsat-8 территории плато Кваркуш на Северном Урале (с абсолютными высотами около 1000 м), а также схема дешифрирования участка с выделением высотных поясов.

Подгольцовый пояс находится непосредственно выше границы леса, где высокоствольная древесная растительность уже не может произрастать по причине низкой температуры и сильных ветров. В этом высотном поясе, в зависимости от условий увлажнения, крутизны и экспозиции склонов и ряда других факторов, распространены криволесье, субальпийские луга и горные тундры.

Криволесье представляет собой изреженные и низкорослые участки леса вблизи верхней границы его распространения в горах. В составе этих сообществ могут преобладать как лиственные (чаще всего береза) так и хвойные (ель, кедр) породы деревьев, которые различными способами адаптируются к воздействию сильных ветров и к каменистой почве. Криволесье часто встречается на крутых склонах (в отличие от горных лугов и тундр), и соседствует с осыпями и скалистыми участками. Дешифровочные признаки криволесья – положение вблизи верхней границы леса, видимая изреженность древостоя (мозаичность), часто участки криволесья приурочены к крутым склонам вблизи осыпей и скал (рис. 3.8.5). Характерна также полосчатая текстура, которая может быть связана с временными водотоками, стекающими с гор.

Горные субальпийские луга распространены выше границы леса на пологих и хорошо увлажненных склонах, чаще южной экспозиции. На летних снимках в синтезе SWIR-NIR-RED горные луга имеют такой же ярко-зеленый, салатный цвет, как и пойменные луга в поймах рек (рис. 3.8.5), для них также характерно очень высокое значение NDVI, причем оно сохраняется в течение почти всего короткого вегетационного периода.

Горные тундры, как правило, расположены выше горных лугов и криволесья и занимают наибольшие площади на пологих склонах или плоских участках как в подгольцовом, так и в гольцовом поясах. Горные тундры, как и равнинные, классифицируются на мохово-лишайниковые, мохово-травяные, мохово-кустарничковые, кустарниковые, стланиковые и др. На плоских участках горные тундры часто заболочены. В синтезе каналов SWIR-NIR-RED горные тундры имеют желтовато-зеленый оттенок, соответствующий преобладанию мохового и травяного покрова. Участки с преобладанием мхов будут иметь более желтый оттенок, а травянистые тундры – ближе к зеленому. В синтезе каналов NIR-RED-GREEN горные тундры имеют различные оттенки с различной долей красного и голубого, что зависит от соотношения травянистой растительности и карликовой березы (чем больше их доля, тем ярче красный оттенок), и с другой стороны мохово-лишайникового покрова и особенно открытых камней (чем выше их доля, тем ярче голубой оттенок).

В пределах гольцового пояса горно-тундровая растительность распространена в основном на пологих и плоских участках склонов,

а также в отрицательных формах рельефа. Большая часть гольцового пояса представлена каменными россыпями и скалами, где встречаются лишь накипные лишайники и мхи. Каменные россыпи и скалы имеют голубой оттенок в синтезе каналов NIR-RED-GREEN, а в синтезе SWIR-NIR-RED они отличаются ярко-красным цветом за счет сильного отражения в среднем ИК диапазоне, характерного для каменистой поверхности. Участки горных тундр в пределах гольцового пояса дешифрируются благодаря красноватому оттенку в синтезе NIR-RED-GREEN и желто-зеленому – в синтезе SWIR-NIR-RED (рис. 3.8.6).

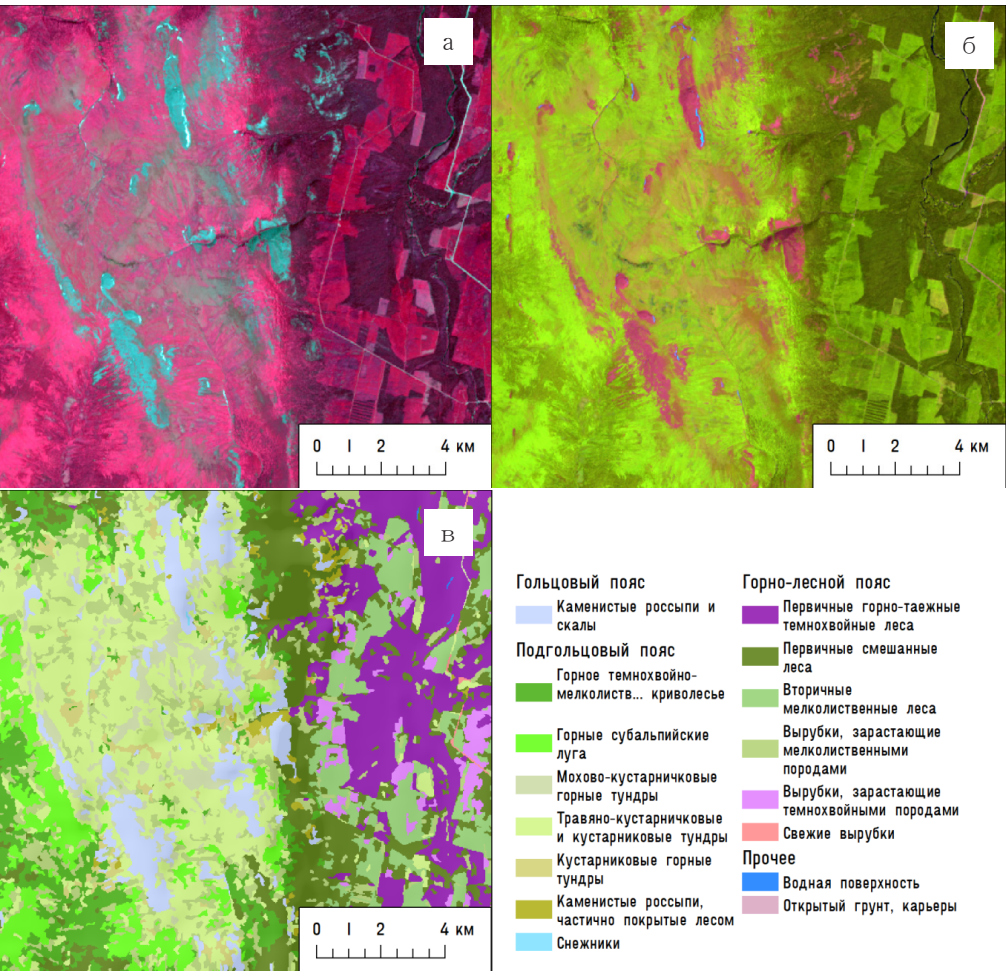


Рис. 3.8.5. Растительность подгольцового пояса (криволесье, горные луга и горные тундры) на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б), и схема дешифрирования участка (в)

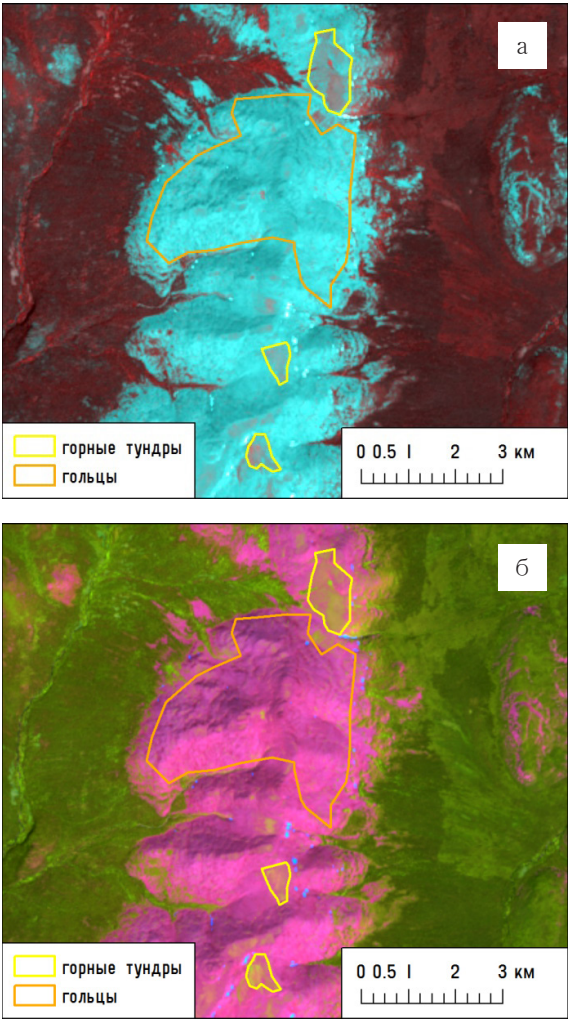
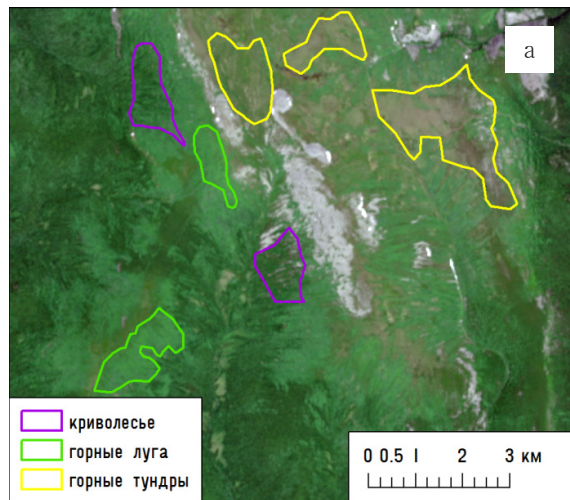


Рис. 3.8.6. Каменные россыпи и участки горной тундры в пределах гольцового пояса на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

При правильной настройке гистограммы изображения все перечисленные растительные сообщества, характерные для подгольцового и гольцового высотных поясов, могут успешно дешифрироваться и по снимкам в естественных цветах (рис. 3.8.7). Стоит отметить сходство дешифровочных признаков горно-тундровой растительности и верховых болот, поскольку значительную роль в обоих типах сообществ играет моховой покров.



Естественная степная растительность

Нераспаханные участки степей сохранились на сравнительно небольших площадях, в основном в пределах особо охраняемых природных территорий. Их главным дешифровочным признаком является отсутствие сельскохозяйственной обработки почвы (нарезки полей и т.п.), в то же время эти участки могут использоваться как пастбища. На естественных степных участках хорошо проявляется роль увлажнения в дифференциации растительного покрова. Наиболее богатым растительным покровом отличаются увлажненные местообитания в поймах рек и в других пониженных формах рельефа. Здесь распространены луговые степи, которые

на летних снимках отличаются высокой яркостью в ближнем ИК диапазоне спектра и имеют ярко-красный оттенок в синтезе каналов NIR-RED-GREEN и ярко-зеленый цвет в синтезе каналов SWIR-NIR-RED. В свою очередь, на возвышенных местоположениях и особенно на южных склонах степная растительность быстро высыхает. Такие участки с изреженной или сухой растительностью в синтезе NIR-RED-GREEN выглядят серо-голубыми, а в синтезе SWIR-NIR-RED имеют красноватый оттенок (рис. 3.8.8).

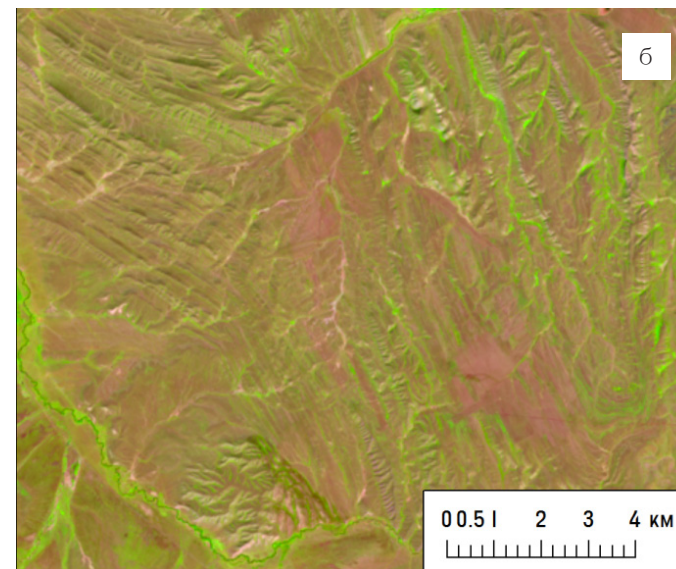
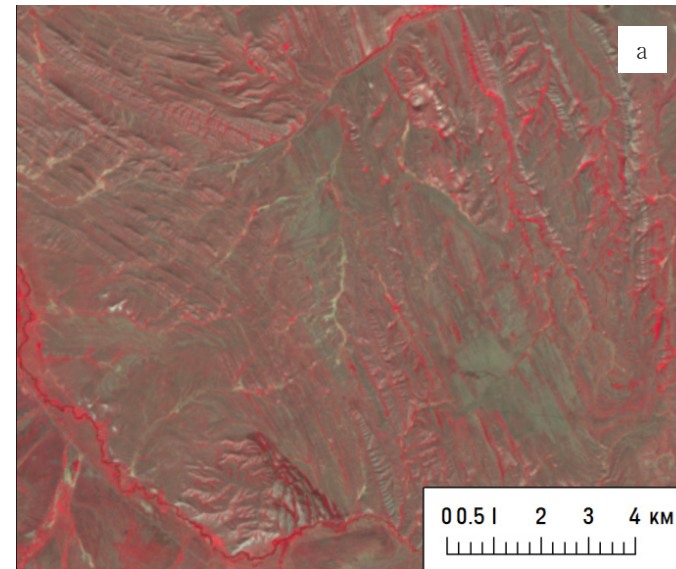


Рис. 3.8.7.
Растительность подгольцового пояса (а) и гольцовый пояс (б) на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе «естественные цвета»

Рис. 3.8.8.
Естественная степная растительность на снимке Landsat-8 летнего сезона в синтезе NIR-RED-GREEN (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Сельскохозяйственным угодьем называется земельный участок, планомерно и систематически используемый для производства сельскохозяйственной продукции. К сельскохозяйственным угодьям относятся пашни, сенокосы, пастбища, земли, занятые многолетними насаждениями (садами, виноградниками и другими), и залежи согласно Земельному кодексу Российской Федерации от 25.10.2001 N 136-ФЗ (ред. от 25.12.2018 с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.01.2019).

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

1. Определение границ и типов сельскохозяйственных угодий (инвентаризация). Для решения этой задачи ключевое значение имеет высокое пространственное разрешение и геометрическая точность снимков. Однако сельхозугодья занимают обширные площади – в некоторых регионах до 60-80% от всей территории. Поэтому для дешифрирования границ и типов угодий 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 угодий 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. Дешифрирование различных видов деградации сельскохозяйственных угодий более подробно рассмотрено в п. 3.10.

Для решения всех перечисленных задач принципиальное значение имеет сезон съемки – необходимо использовать снимки бесснежного периода.

Для визуального анализа состояния сельскохозяйственных угодий 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. 3.9.1 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.

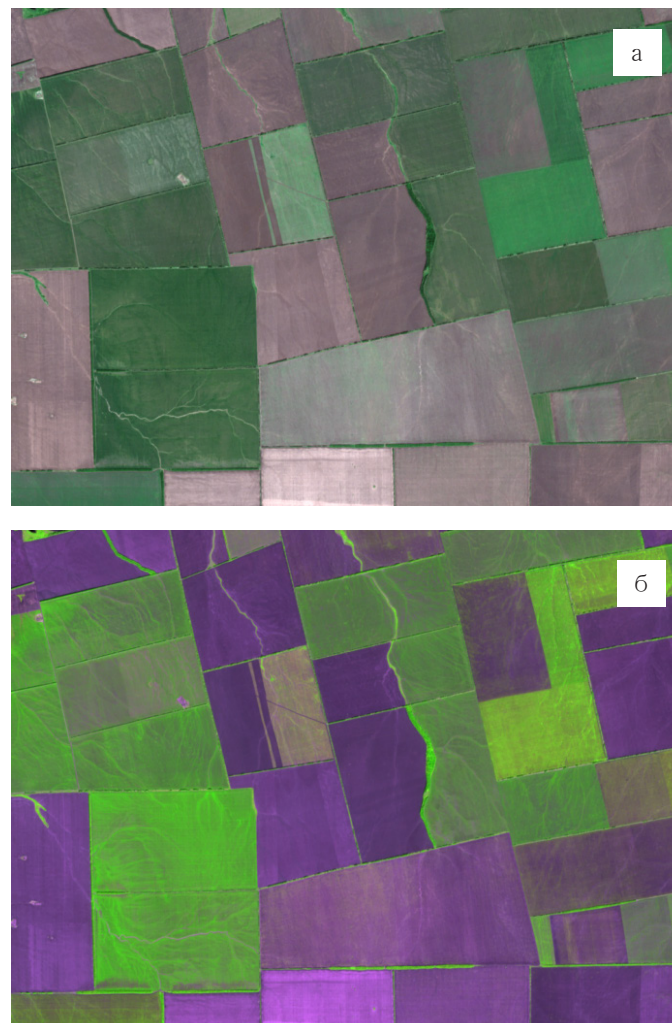


Рис. 3.9.1. Отображение пашни с посевами сельскохозяйственных культур в разной стадии вегетации на снимке Sentinel-2B: а) в натуральной цветопередаче (RED-GREEN-BLUE); б) в искусственной цветопередаче (GREEN-NIR-RED).

Ниже в данном разделе используются снимки высокого разрешения со спутников SPOT-6/7, которые имеют 4 спектральных канала (NIR, RED, GREEN, BLUE). В связи с этим, синтезы с использованием среднего ИК диапазона спектра в данном разделе не приведены и не обсуждаются.

Дешифрирование границ сельскохозяйственных угодий

Контурами сельскохозяйственных угодий 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 угодий представлен на рис. 3.9.2. При дешифрировании необрабатываемых участков полей важно изучить разновременные данные ДЗЗ, так как отдельные участки полей могут распахиваться в разные сезоны.



Рис. 3.9.2. Пример выделения границ сельскохозяйственных угодий по снимку SPOT-6, синтез каналов GREEN-NIR-RED

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

Заращение сельскохозяйственных угодий 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 распахкой 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 угодий и примеры дешифрирования на материалах космической съемки.

Пашни

Пашня – самое ценное и продуктивное угодье. К ней 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, вывозные поля и чистые пары. К пашне не относят распаханые с целью коренного улучшения сенокосы и пастбища, а также используемые под посевы междурядья садов.

На материалах космической съемки пашни обладают довольно четкими границами, имеют определенную «геометричность» формы и однотонность внутри отдельного поля. 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 распахки), 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.

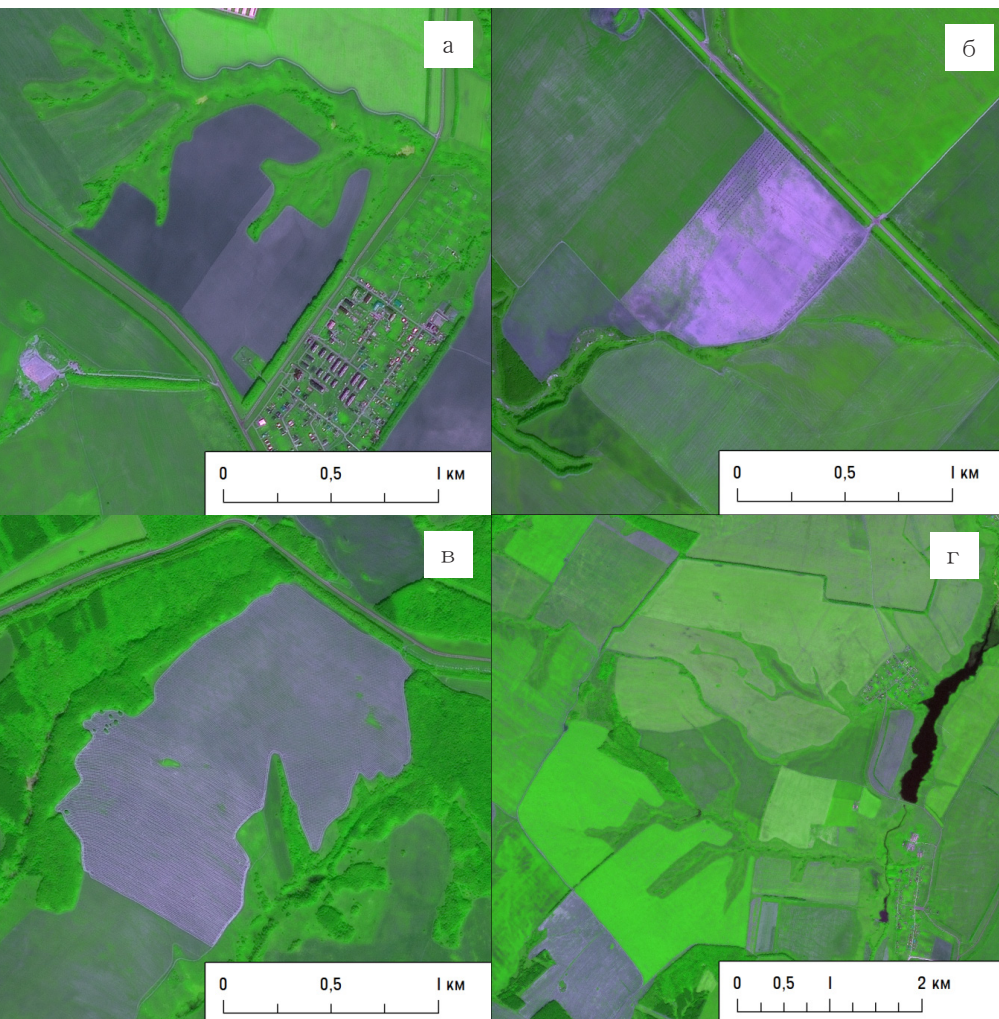


Рис. 3.9.3. Изображение пашни на снимке SPOT-7, синтез каналов GREEN-NIR-RED: а) свежевспаханная почва; б) сухая почва; в) вспаханная почва со следами движения сельскохозяйственной техники; г) пашни с растительностью в различных стадиях вегетации.

Свежевспаханную почву в синтезе каналов GREEN-NIR-RED можно отличить по яркому темно-фиолетовому цвету (рис. 3.9.3, а). 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 (рис. 3.9.3, б) и сиреневой (синтез каналов GREEN-NIR-RED). На снимках высокого разрешения могут быть видны борозды, остав-

ленные после обработки почвы сельскохозяйственной техникой (рис. 3.9.3, в). На рис. 3.9.3 (г) можно увидеть поля различных оттенков зеленого цвета, соответствующих разным стадиям вегетации сельскохозяйственных культур. Чем ярче и насыщеннее 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.

В комбинации каналов NIR-RED-GREEN (рис. 3.9.4) растительность имеет красные оттенки, поскольку сильно отражает инфракрасное излучение, и в данном синтезе ИК 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, распаханых с целью коренного улучшения.

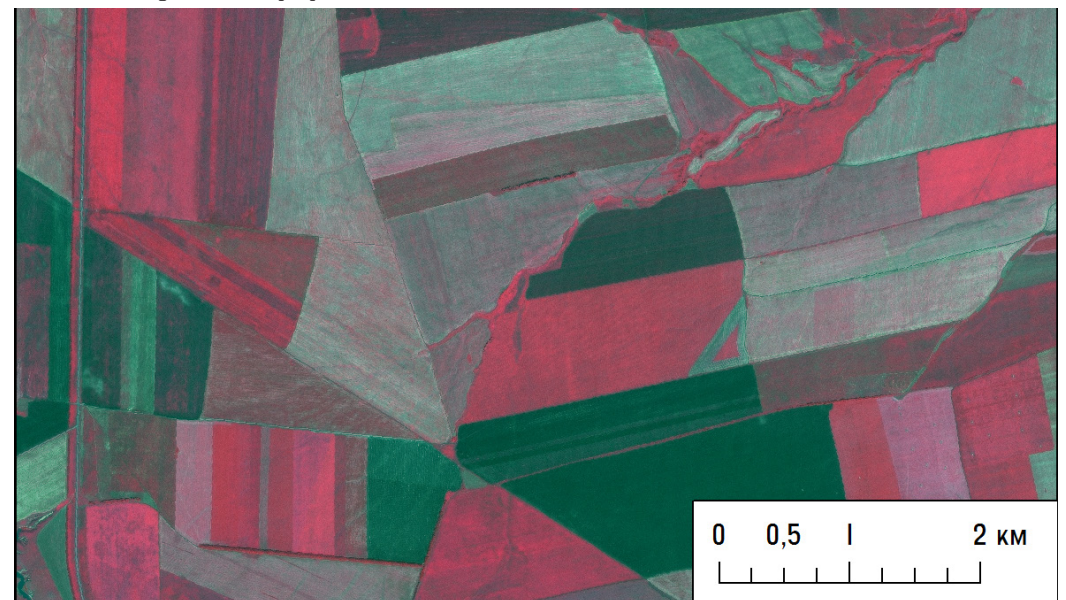


Рис. 3.9.4. Изображение пашни на снимке SPOT-6, синтез каналов NIR-RED-GREEN.

Многолетние насаждения

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.

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.



Рис. 3.9.5 Виноградники. Снимок сверхвысокого разрешения с открытого картографического сервиса

Сады и плодопитомники 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. 3.9.6).

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. 3.9.5 показаны крупные массивы виноградников правильной геометрической формы.



Рис. 3.9.6. Питомник семечковых культур. Снимок сверхвысокого разрешения с открытого картографического сервиса

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.



Рис. 3.9.7. Сенокосы на снимках SPOT-6/7 в синтезе естественных цветов

Изображение пастбищ, сенокосов и залежей сходно между собой, что вызывает трудности их выявления (рис. 3.9.7). Распознавать тип угодий 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, вытоптанных у водоемов и на местах стоянок, наличие специальных сооружений – загонов, навесов и т. п. (рис. 3.9.8).

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

Залежь

К залежам относятся угодья, 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. 3.9.9).



Рис. 3.9.9. Примеры залежи (На рисунке слева - частично зарастающей древесной 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 разновременных космических снимков, чтобы убедиться в том, что это поле периодически вводилось в оборот. Это позволяет отличить залежь от пара (когда вспаханное поле оставляют незасаженным только на один сезон). Если поле не засеивается более одного года, начиная с осени, то оно становится залежью.

3.10. ДЕГРАДАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ

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

Дегградация 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 дегградации сельскохозяйственных угодий, используются данные спутниковой съемки среднего и высокого пространственного разрешения. Используются те же комбинации каналов, как при дешифрировании сельскохозяйственных угодий. 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 сельхозугодий 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.

Ниже даны определения и рассмотрены признаки дешифрирования некоторых явлений и процессов, которые могут привести к деградации почвенного покрова на сельскохозяйственных угодьях.

Линейная (овражная) эрозия

Линейная эрозия – это размыв земной поверхности (почвы) постоянными или временными водотоками с образованием различных эрозионных форм (промоин, рытвин, ложбин, оврагов). Линейная эрозия вызывается талыми и дождевыми водами, стекающими значительной массой, сконцентрированной в узких пределах участка склона. В результате сильных дождей или интенсивного снеготаяния происходит размыв грунта в глубину, обвал стенок, образование глубоких промоин, рытвин, которые постепенно перерастают в овраги, и пашни становятся непригодными к использованию. Более всего подвержены линейной эрозии участки, примыкающие к руслам рек, ручьям, оврагам и балкам, в которые стекают образовавшиеся водные потоки. Устья ложбин часто расположены на отвершках или бровках оврага (см. схему – рис. 3.10.1). Эрозионные процессы чаще развиваются на территории с углом наклона от 2°, при рыхлом характере почв и подстилающих пород.

Линейная эрозия происходит как на небольших участках поверхности в рамках одного поля (общая длина участка развития эрозии от нескольких метров), так и на очень обширной территории. Один эрозионный участок может пересекать несколько полей.

Система ложбин, оврагов и балок четко выделяется на космических снимках. Для нее характерен ветвистый древовидный

рисунок (рис. 3.10.2) с четкими или нечеткими очертаниями (в случае слабого нарушения почвенного покрова).

Весной в эрозионных ложбинах снег задерживается дольше, чем на открытых участках (рис. 3.10.3), что также является их важным дешифровочным признаком.

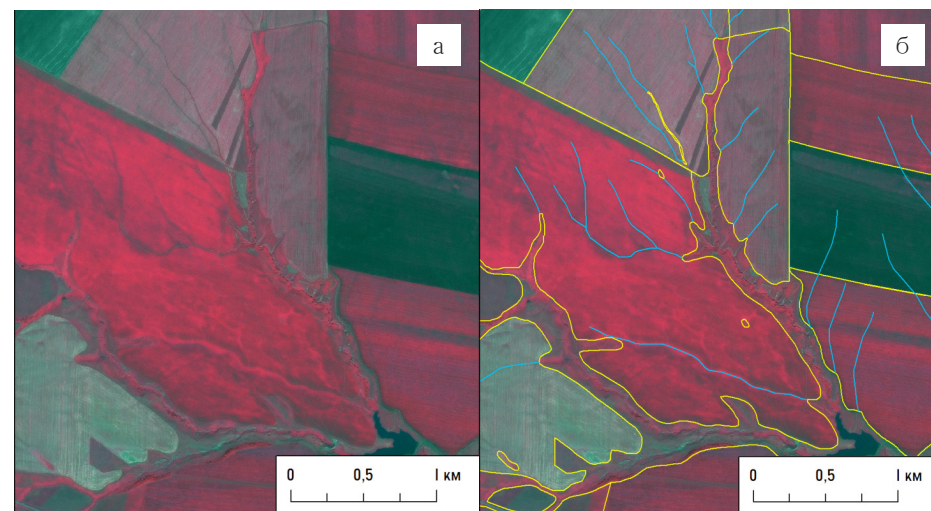


Рис. 3.10.2. Эрозионная сеть: а) фрагмент космического снимка SPOT-6 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN; б) тот же фрагмент с элементами дешифрирования линейной эрозии. Желтые контуры - границы полей, синие линии - эрозионная сеть



Рис. 3.10.3.
Задержание снега
в эрозионной сети
в период весеннего
снеготаяния
(желтым цветом
выделены контуры
полей). Снимок
Sentinel-2A от 12.04.2019.

На ранних стадиях участки эрозии могут подвергаться вспашке, что дает «размытый» рисунок эрозионной сети (рис. 3.10.4, а). При формировании устойчивых врезанных форм рельефа эродированные участки выводят из сельскохозяйственного оборота (рис. 3.10.4. б).

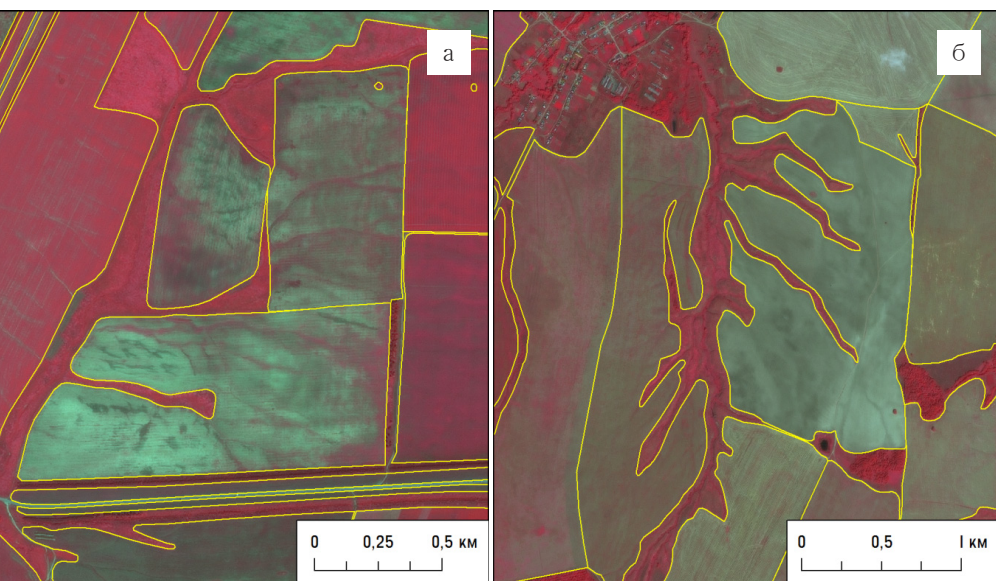


Рис. 3.10.4. Участки эрозии на снимке SPOT-6 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN:
а) распаханые; б) выведенные из сельскохозяйственного оборота. Желтыми контурами обозначены границы полей

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. 3.10.5 (а) отображена система параллельных друг другу ложбин на склоне. На рис. 3.10.5, (б) показаны углы наклона склонов для этого же участка.

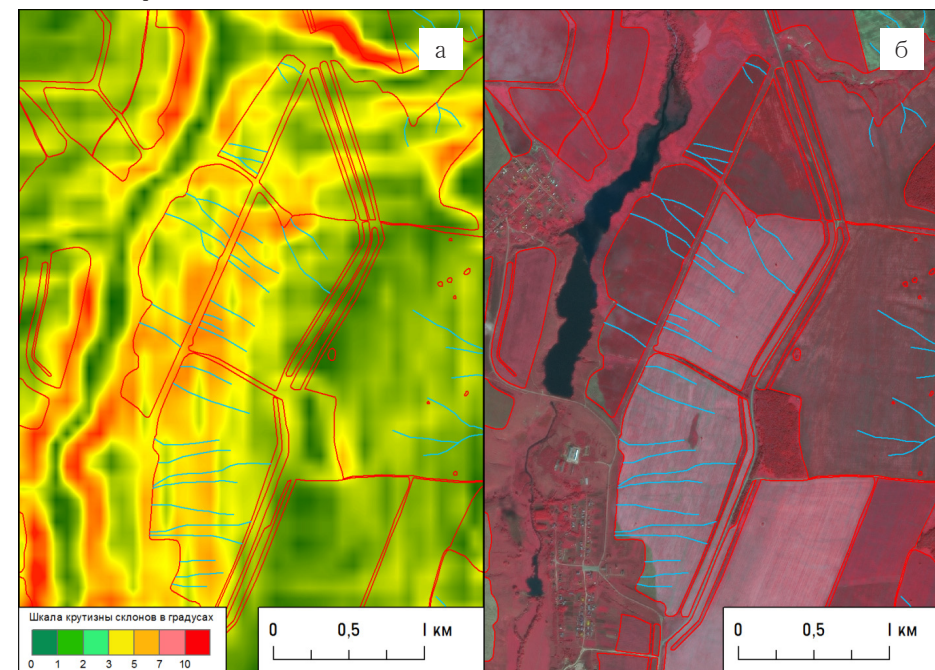


Рис. 3.10.5. Линейная эрозия на склонах:
а) космический снимок SPOT-6 в синтезе
NIR-RED-GREEN; б) карта крутизны склонов.
Красные контуры - границы полей, синие
линии - эрозионная сеть

Плоскостная эрозия

Плоскостная эрозия (плоскостной смыв) – это равномерный смыв верхних, наиболее плодородных горизонтов почвы дождевыми, талыми 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. 3.10.6). Также может возникать на небольших возвышенностях (рис. 3.10.7).

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.

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. 3.10.8). 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.

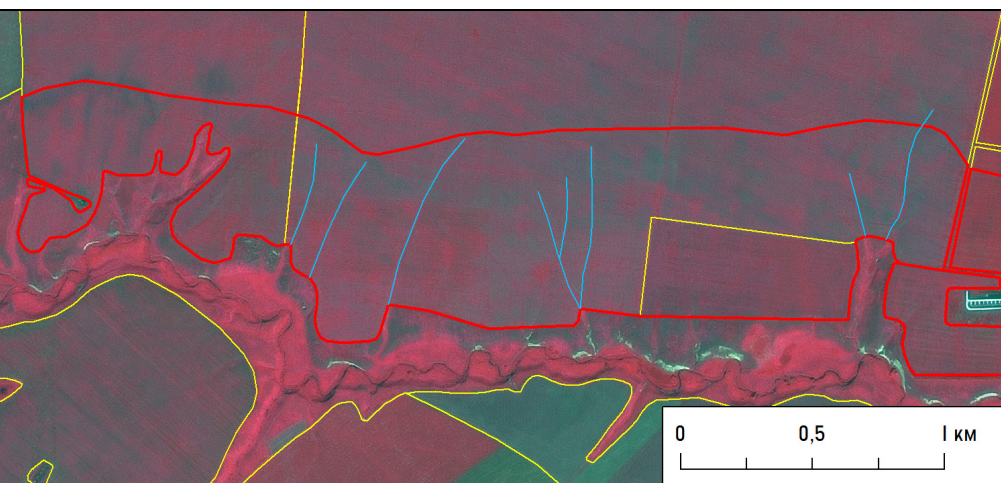


Рис. 3.10.6. Отображение плоскостного смыва почв на снимке SPOT-6 в синтезе каналов NIR-RED-GREEN. Красный контур - область развития плоскостной эрозии на склоне, синие линии - эрозионная сеть

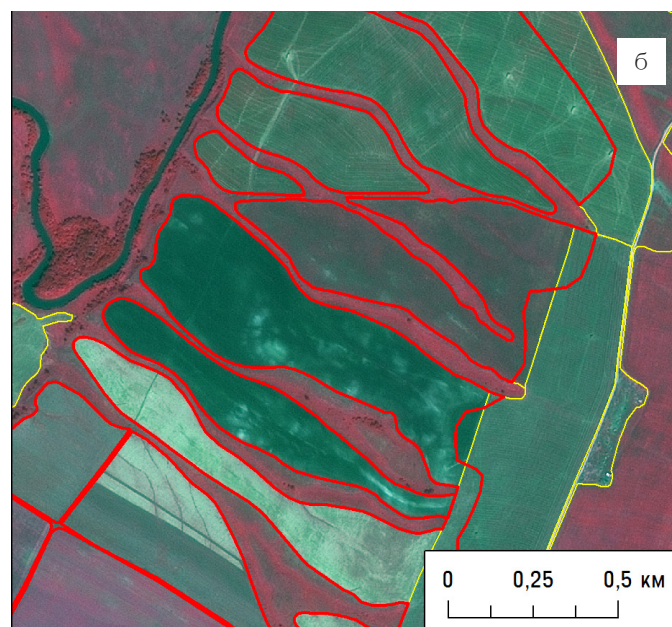
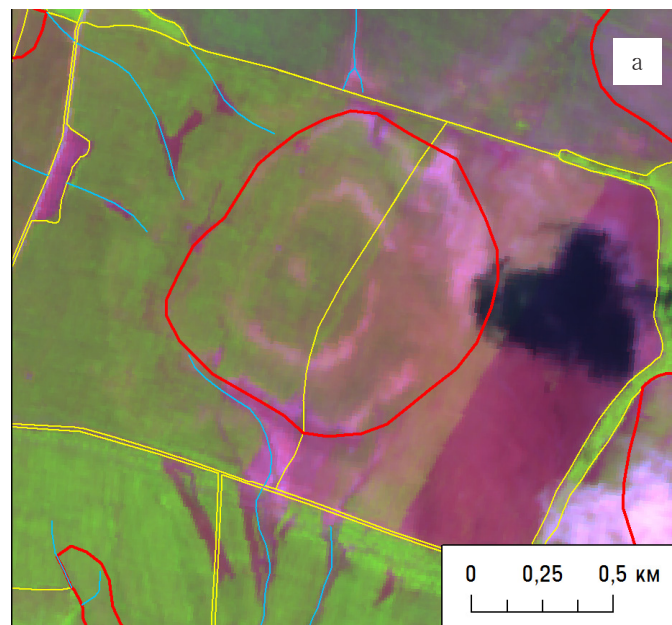


Рис. 3.10.7. Плоскостная эрозия:
а) на холме;
б) в зоне овражно-балочной сети, приуроченной к пойме реки. Желтыми линиями показаны границы полей, красными - участки полей, подверженные развитию плоскостного смыва

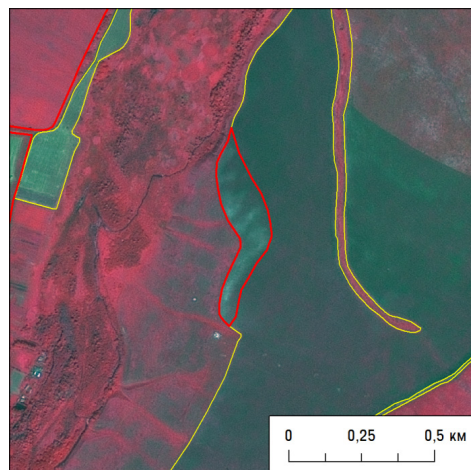


Рис. 3.10.8. Участок поля, приуроченный к пойме реки, с уклоном до 5° . Красным контуром в центре снимка выделен участок с активным развитием плоскостной эрозии, освещенный относительно общего фона распаханной почвы

Переувлажнение почв

Переувлажнение – это процесс постепенного увеличения влагосодержания грунтов и почв до значений, превышающих климатически обусловленную норму для данной местности. Причины возникновения переувлажнения связаны как с естественными факторами, так и с различными видами хозяйственной деятельности человека – ирригацией, гидротехническим строительством, промышленным и коммунальным водопотреблением, агротехническими приемами накопления влаги в почвах, землеустроительной деятельностью. Переувлажненные почвы формируются в условиях избыточного увлажнения, вызванного большим количеством атмосферных осадков, отсутствием достаточного стока, высоким уровнем грунтовых вод. Этот процесс развивается в замкнутых понижениях рельефа, днищах эрозионных форм, поймах рек.

Переувлажнения приурочены к понижениям в рельефе, в первую очередь к замкнутым понижениям и микропонижениям на контуре поля. Они могут локализоваться на территориях с ложбинами, промоинами (рис. 3.10.9), на слабо дренируемых плоских и слабонаклонных поверхностях. На склонах и других участках с хорошим дренированием данный процесс проявляется реже.

В зависимости от степени переувлажнения в зонах развития негативного процесса растительные сообщества могут сменяться на более влаголюбивые (рис. 3.10.10), или находиться в угнетенном состоянии. Зачастую к таким зонам приурочены участки распространения сорной растительности. В микропонижениях рельефа могут присутствовать следы пребывания воды. Анализ ЦМР также

помогает подтвердить правильность определения переувлажненных участков. Косвенными признаками развития переувлажнения может служить его близость к крупным водным объектам (высокий уровень грунтовых вод), болотным массивам. Переувлажнение дешифрируется, в том числе, как сопутствующий процесс для заболачивания, затопления, подтопления и водной эрозии.

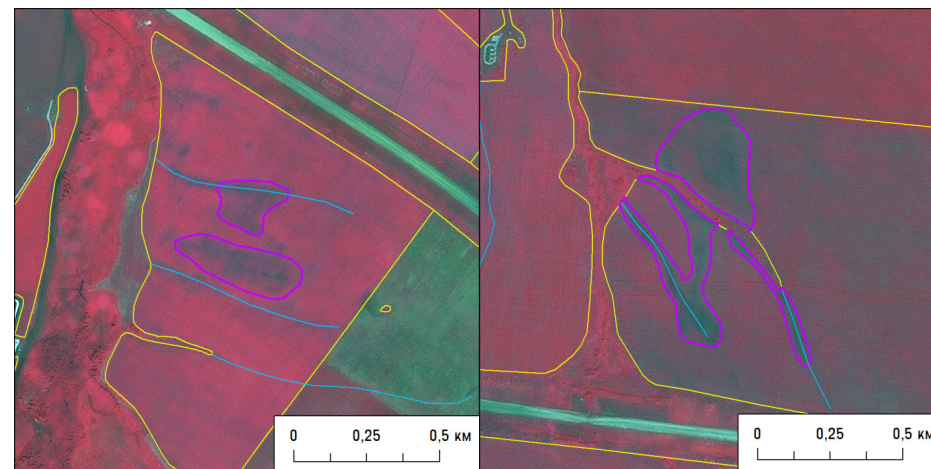


Рис. 3.10.9. Переувлажнение в зоне развития водной эрозии: участки замкнутой формы более темного относительно основного фона оттенка, в пределах которых растительный покров менее развит (выделены фиолетовыми контурами), границы полей – желтые контуры, эрозионная сеть – синие линии

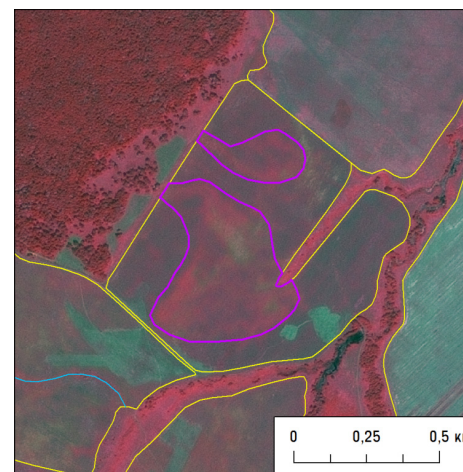


Рис. 3.10.10. Участки переувлажнения замкнутой формы с влаголюбивой растительностью (выделены фиолетовыми контурами), границы полей – желтые контуры, эрозионная сеть – синие линии

Заращение древесно-кустарниковой растительностью

Заращение сельскохозяйственных земель происходит вследствие прекращения их использования в лесной зоне. В зависимости от местоположения участка и расстояния до ближайших лесных массивов, заращение может начаться через несколько лет после прекращения обработки (распашки или регулярного сенокоса). Через 10-15 лет поле зарастает кустарником и мелколесьем и становится непригодным для выращивания сельскохозяйственных культур.

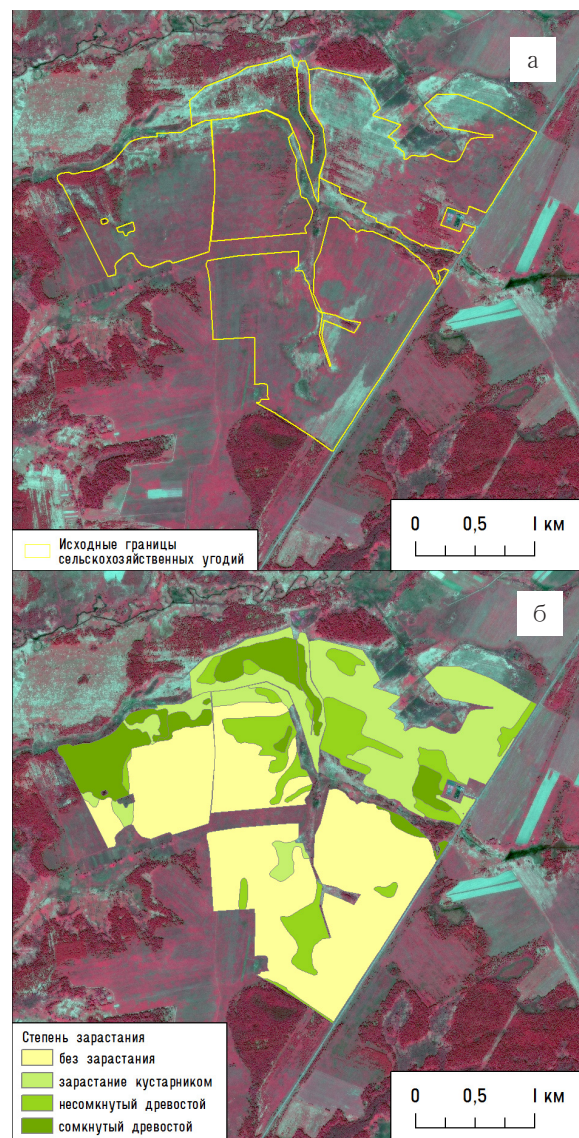


Рис. 3.10.11. Вариант классификации участков зарастания сельскохозяйственных угодий древесно-кустарниковой растительностью. Съемка SPOT-7, синтез каналов NIR-RED-GREEN: а) исходные снимок с контурами полей, б) результаты дешифрирования

Более подробно дешифрирование залежей рассмотрено в разделе 3.9. (пункт «Залежь»). Для определения возраста древесно-кустарниковой растительности, восстанавливающейся на сельскохозяйственных угодьях, необходимо использовать разновременные снимки. Вариант дешифрирования зарастания сельскохозяйственных угодий показан на рис. 3.10.11.

Антропогенное воздействие

В данный класс воздействия условно можно включить загрязнение сельхозугодий химическими веществами, тяжелыми металлами, захламление отходами производства и потребления, разработку полезных ископаемых, проведение геологоразведочных, строительных и других видов работ на территории сельскохозяйственных угодий, а также пожары и перевыпас скота. Для получения информации о границах угодий, категории земель и вида разрешенного использования земельного участка необходимо использовать данные ЕГРН (Единый Государственный Реестр Недвижимости) путем запроса выписки из ЕГРН, либо использовать сервис Публичная кадастровая карта (<https://pkk5.rosreestr.ru>).

Многие виды нарушений сельскохозяйственных земель, обусловленных антропогенным воздействием, дешифрируются по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения. К примеру, по таким снимкам может быть выявлен факт захламления бытовыми и производственными отходами (это могут быть мешки от семенного материала, складирование запчастей от сельскохозяйственной техники и т.п.). Пример приведен на рис. 3.10.12. Может быть отмечен также факт самовольного занятия участка сельскохозяйственных земель при проведении строительных и геологоразведочных работ, дешифрируемый по снимкам высокого и сверхвысокого разрешения.

Многие сельскохозяйственные организации прибегают к самому дешевому способу очистки сельскохозяйственных угодий от сухой растительности и стерни – выжиганию. Палы травы – одна из причин лесных и торфяных пожаров (когда возгорание переходит с поля на другие территории), уничтожения экосистем, различного рода инфраструктуры, а иногда и пожаров в населенных пунктах. Регулярное выжигание сухой травы обедняет видовой состав травянистой растительности, уничтожает плодородный слой почвы, провоцирует эрозию, губят полезных (в том числе, для сельского хозяйства) насекомых, уничтожают среду обитания пресмыкающихся и земноводных. Законом предусмотрена ответственность за неконтролируемые поджоги сухой травы и сельхозпалы.



Рис. 3.10.12. Захламление сельскохозяйственного угодья. Красной линией обозначены границы земельного участка. Разрешенное использование участка – для сельскохозяйственного производства. Снимки сверхвысокого разрешения с открытого картографического сервиса. Дата снимка: а) 15.05.2017; б) 07.05.2018. Красной стрелкой указан захламленный участок, примыкающий к железнодорожной станции



Рис. 3.10.13. Сжигание сухой растительности на рисовых чеках в Краснодарском крае. Снимок Sentinel-2A 11.10.2018.

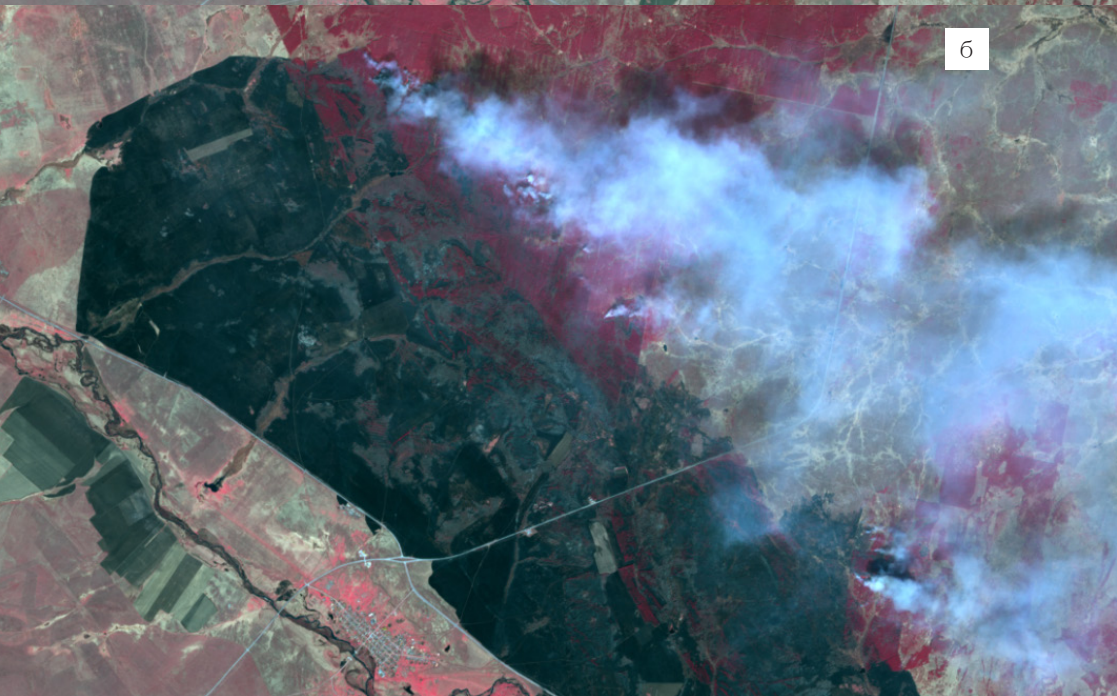


Рис. 3.10.14. Сельскохозяйственный пал в Челябинской области (с переходом пожара на лесной массив). Съемка Sentinel-2A: а) до пожара, 13.05.2015; б) во время пожара, 15.05.2015; в) после пожара, 23.05.2015.

3.11. Промышленные и техногенные объекты. Загрязнение природной среды

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 железнодорожных 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 (рис. 3.11.1). Характерным признаком машиностроительных комплексов и предприятий военно-промышленного комплекса являются крупные производственные корпуса, наличие внутренних железнодорожных путей (рис. 3.11.2). 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 (рис. 3.11.3, б). Такие же тепловые аномалии характерны, например, для факелов сжигания попутного газа на нефтедобывающих производствах.

В целом дешифрирование промышленных объектов редко

производится по снимкам среднего пространственного разрешения, поэтому в данном пособии оно рассмотрено лишь в самом общем плане.



Рис. 3.11.1.
Предприятия
нефтехимического
комплекса
(г. Пермь). Снимок
Sentinel-2 в синтезе
естественных
цветов (а) и в
синтезе
SWIR-NIR-RED (б)

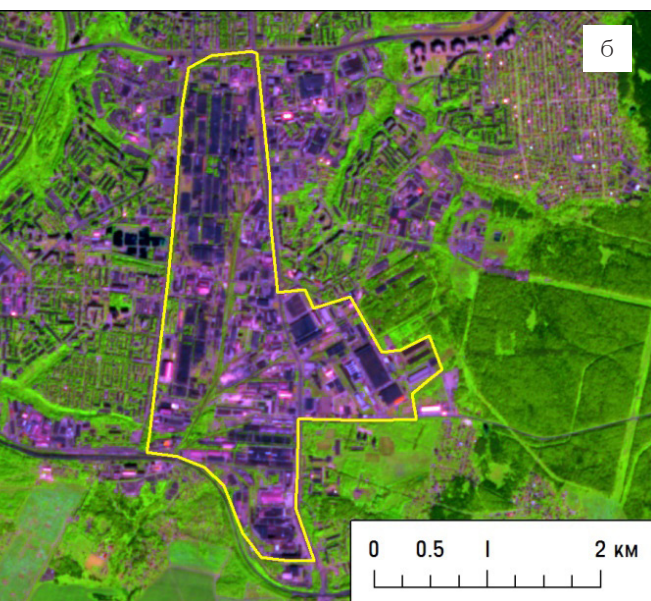
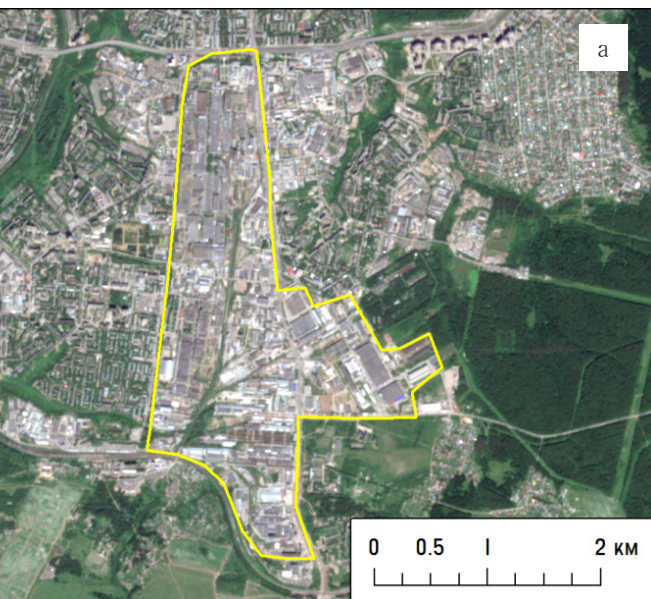


Рис. 3.11.2.
Машиностроительные предприятия и складские объекты (г. Пермь). Снимок Sentinel-2 в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

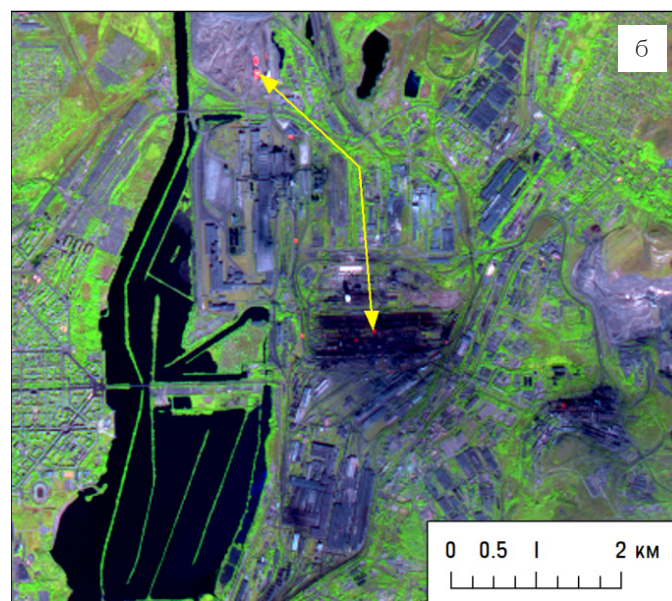
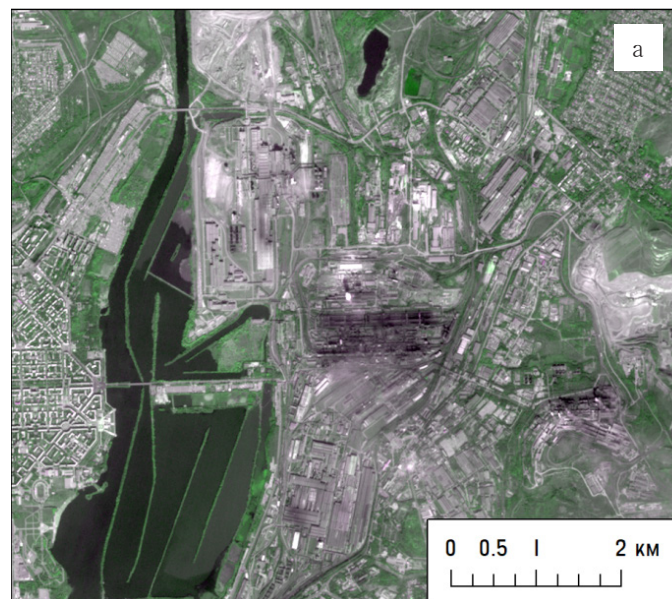


Рис. 3.11.3.
Металлургический комбинат полного цикла (г. Магнитогорск) на снимке Sentinel-2 в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б). Стрелками обозначены наиболее выраженные тепловые аномалии

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.

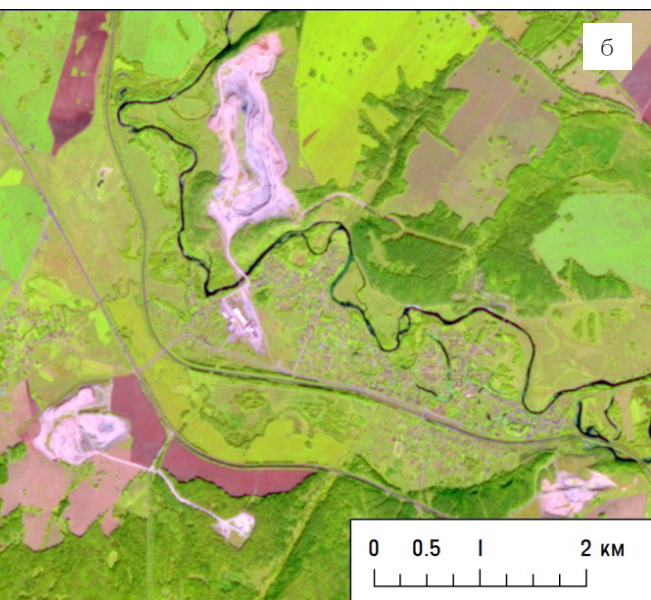
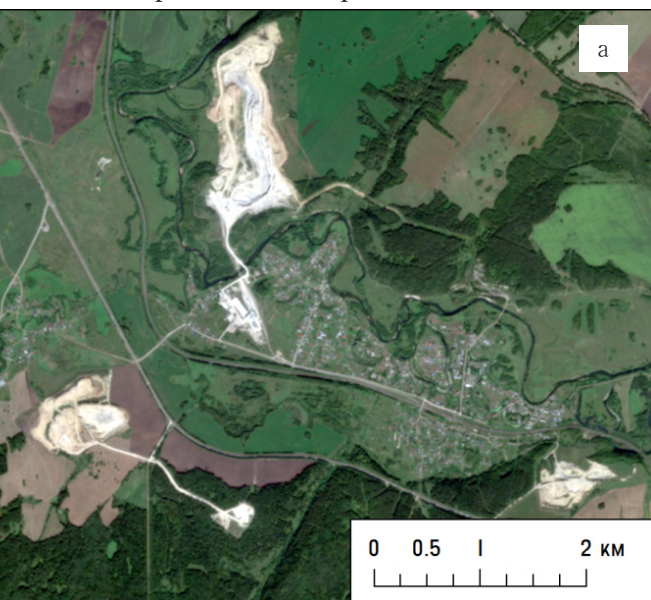


Рис. 3.11.4. Карьеры по добыче гипса у пос. Ергач (Пермский край). Снимок Sentinel-2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а) и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

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. 3.11.4). 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.

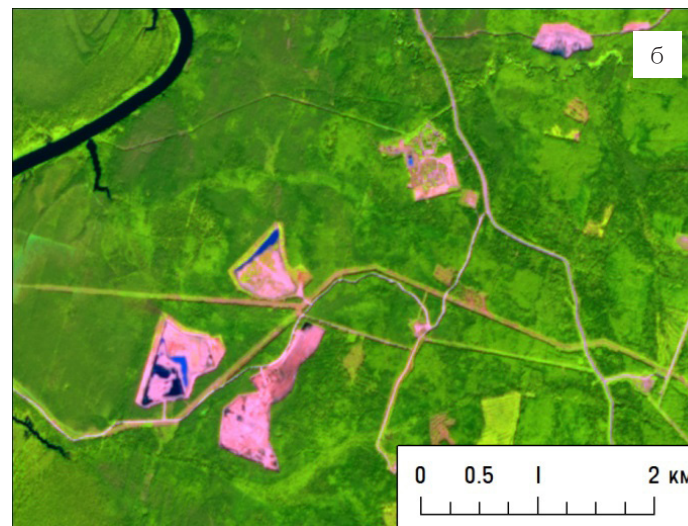
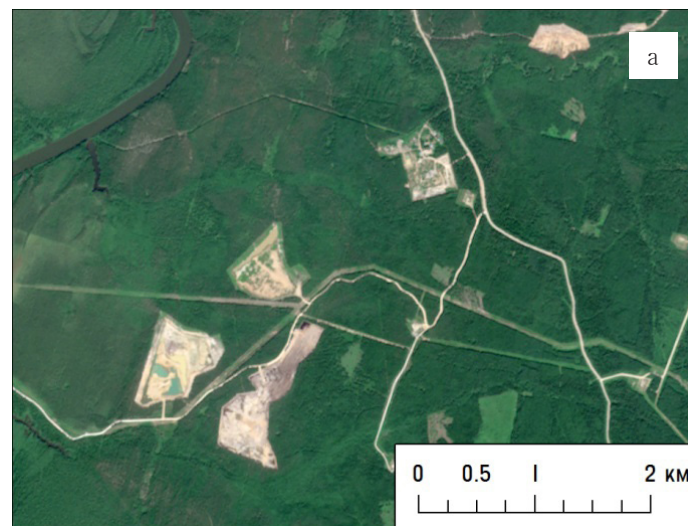


Рис. 3.11.5. Карьеры по добыче песка или песчано-гравийной смеси. Снимок Sentinel-2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Открытая порода в карьерах по добыче известняка или гипса имеет ярко-белый цвет (рис. 3.11.4), 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. 3.11.5).

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. 3.11.6). 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.

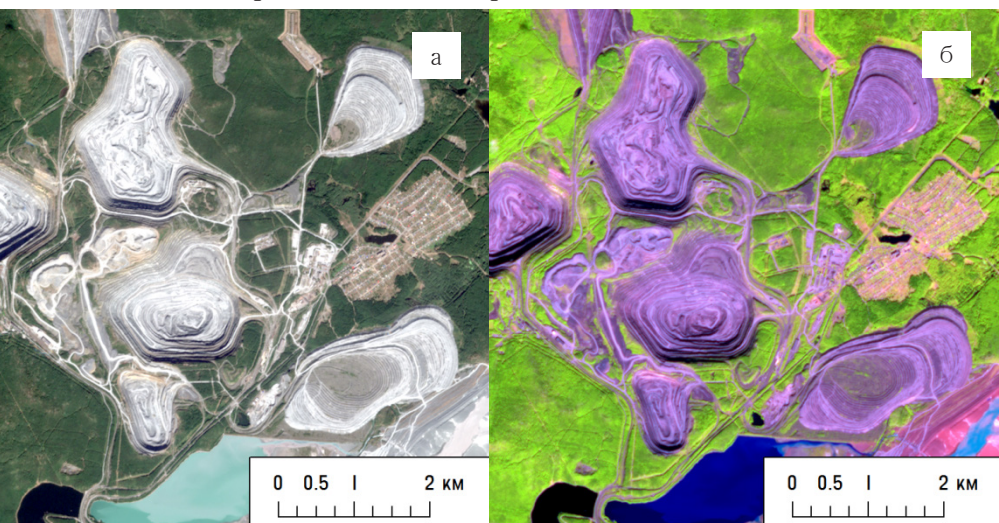


Рис. 3.11.6. Карьеры по добыче металлургического сырья (железной руды) в г. Качканар. Снимок Sentinel-2 в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

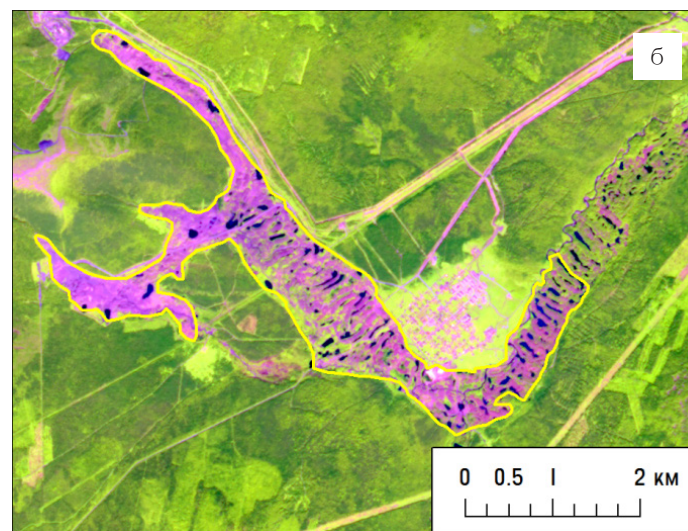
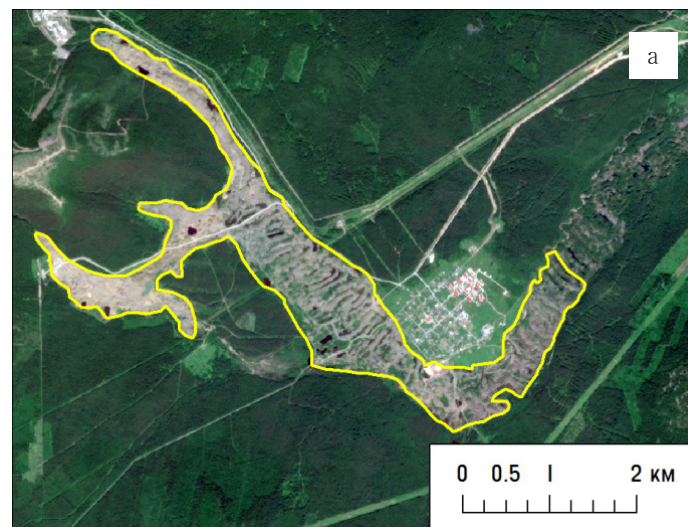


Рис. 3.11.7. Последствия разработки месторождения алмазов дражным способом (Красновишерский район Пермского края). Снимок Sentinel-2 в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

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. 3.11.7).

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.

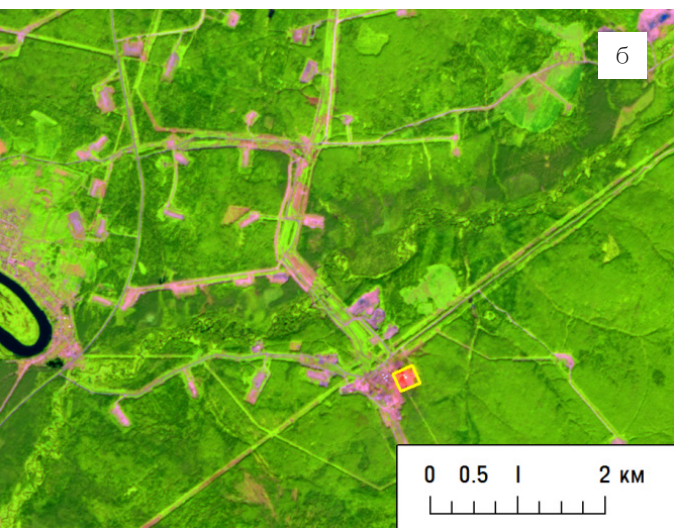
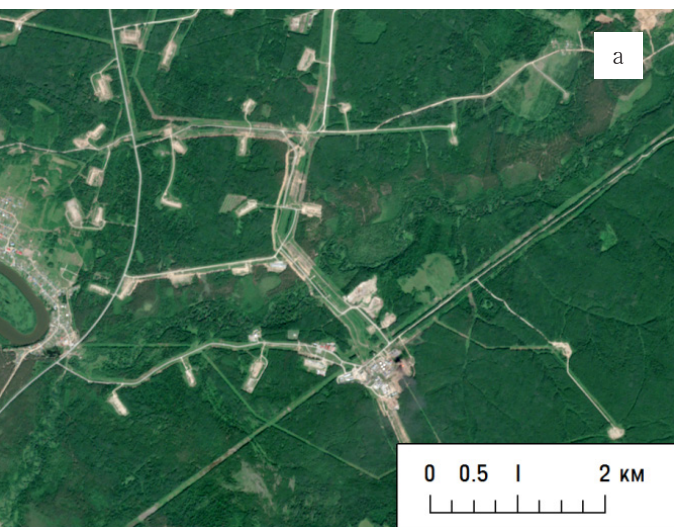


Рис. 3.11.8. Разрабатываемое нефтяное месторождение на снимке Sentinel-2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (6), прямоугольником выделен факел сжигания попутного газа

Последние хорошо видны в синтезе каналов SWIR-NIR-RED (благодаря высокой яркости в канале SWIR) и выделяются как тепловые аномалии (рис. 3.11.8).

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 пожароопасности, а возникающие на осушенных торфяниках пожары крайне сложно поддаются тушению и могут продолжаться несколько месяцев.

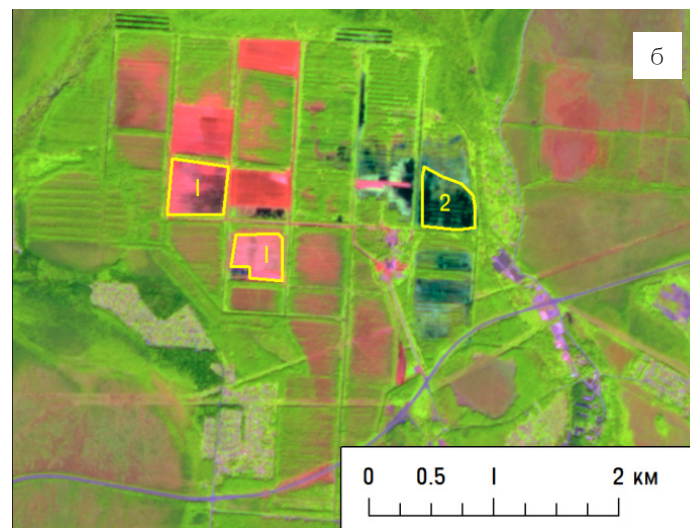


Рис. 3.11.9. Торфоразработки: осушенные (1) и затопленные (2) торфяные карьеры в районе г. Краснокамска, Пермский край на снимке Sentinel-2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (6)

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.

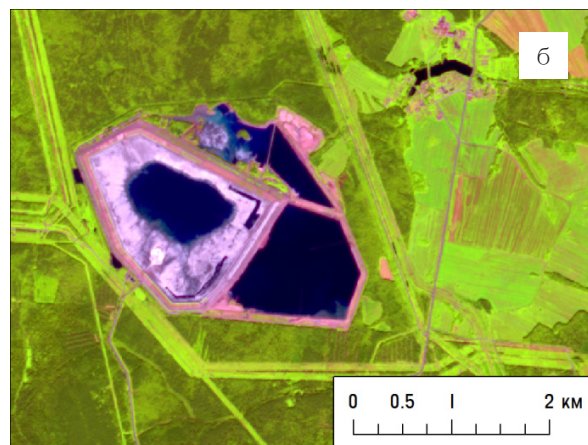
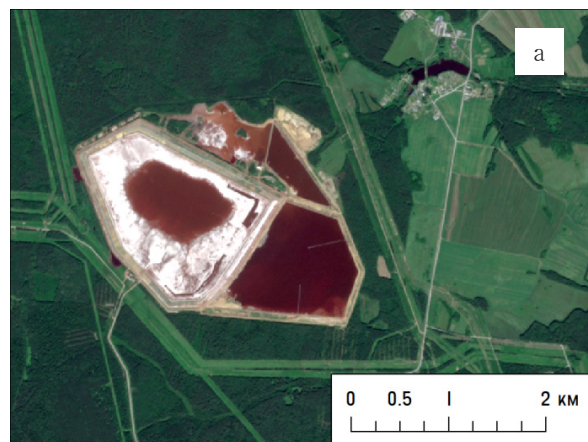


Рис. 3.11.10. Шламо-хранилище отходов металлургического производства (г. Краснотурьинск Свердловской области). Снимок Sentinel-2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

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.

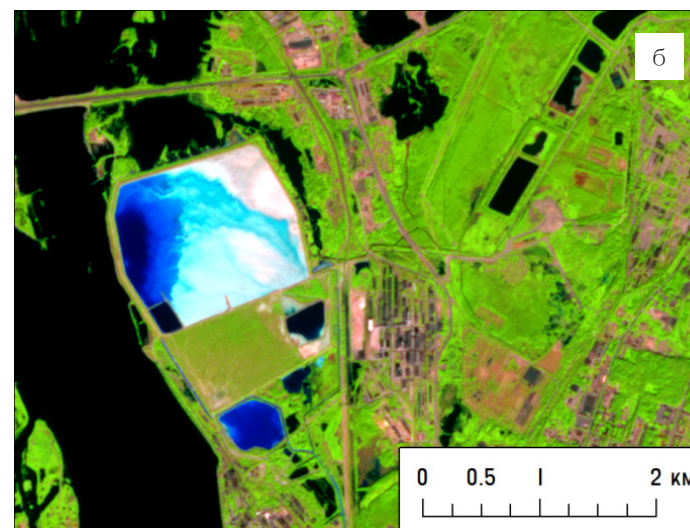
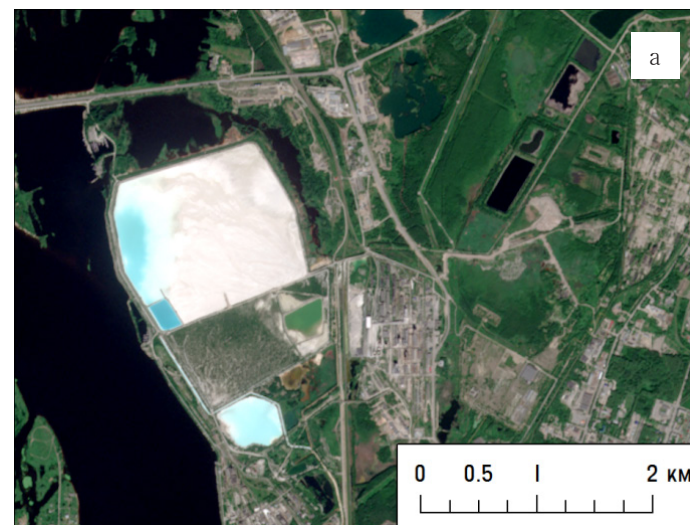


Рис. 3.11.11. Хранилище отходов содового производства (г. Березники Пермского края) на снимке Sentinel-2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

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 (рис. 3.11.10).

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. 3.11.11).

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. 3.11.12, 3.11.13). 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 объектов) 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.

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. 3.11.14).

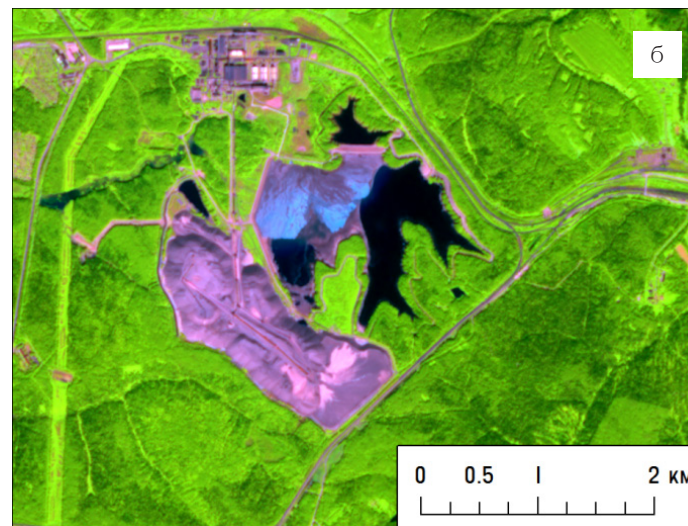
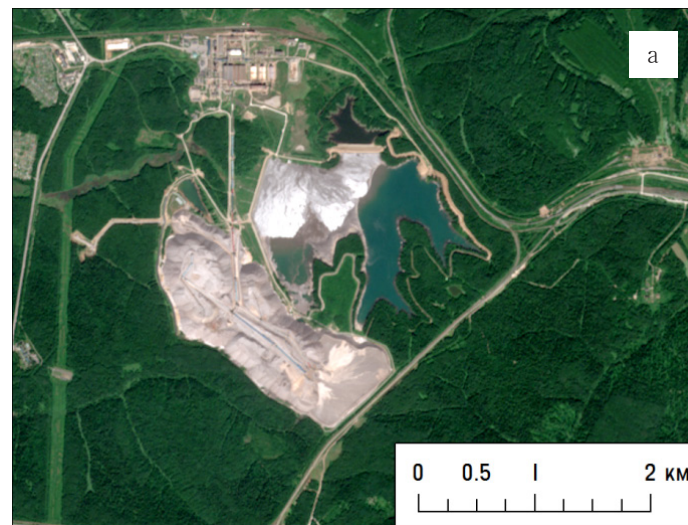


Рис. 3.11.12. Отвалы, образованные при добыче калийно-магниевых солей вблизи г. Березники Пермского края. Снимок Sentinel-2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

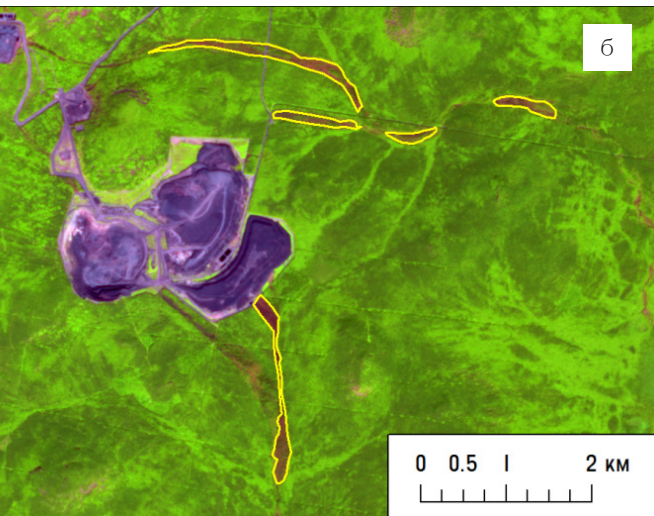
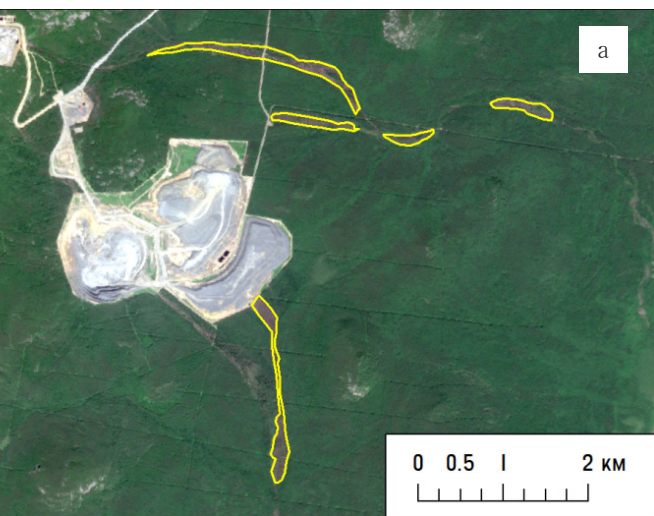


Рис. 3.11.13. Породные отвалы месторождения медно-цинковых руд и участки погибшей от загрязнения растительности в поймах рек (север Свердловской области). Снимок Sentinel-2 в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

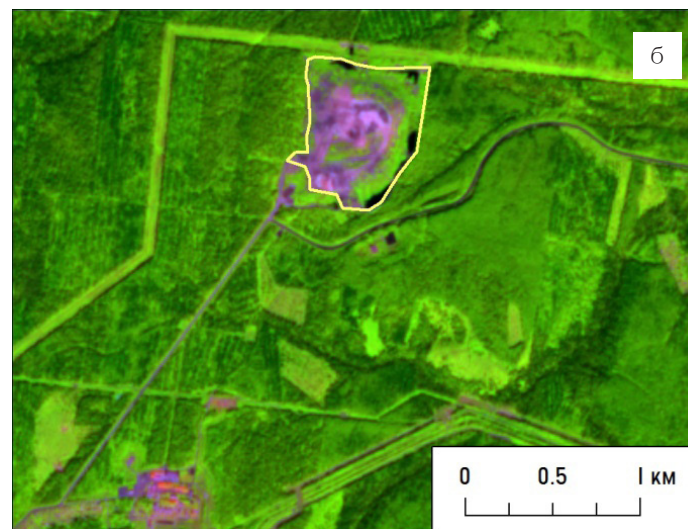


Рис. 3.11.14. Полигон хранения твердых бытовых отходов на снимке Sentinel-2 летнего сезона в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (б)

Некоторые виды загрязнения природной среды

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 (тепловое загрязнение).

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. 3.11.15). 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).

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 сельхозугодий. Цветение воды наиболее успешно выявляется по снимкам в синтезе естественных цветов (рис. 3.11.16). 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.

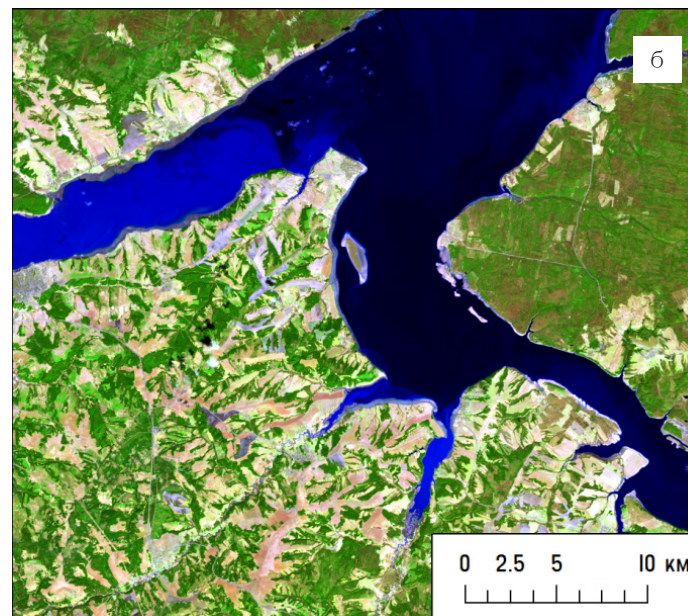
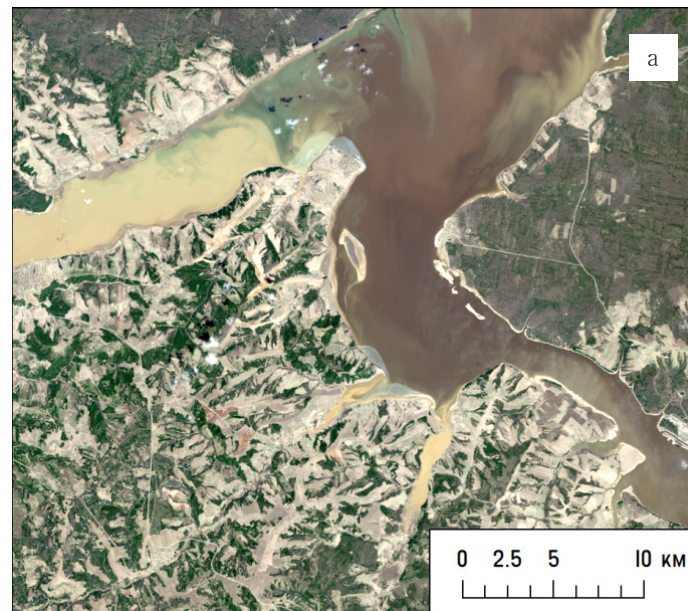


Рис. 3.11.15. Поступление воды с повышенной мутностью в Камское водохранилище в период весеннего половодья. Снимок Landsat-8 в синтезе естественных цветов (а), и в синтезе SWIR-NIR-RED (6)

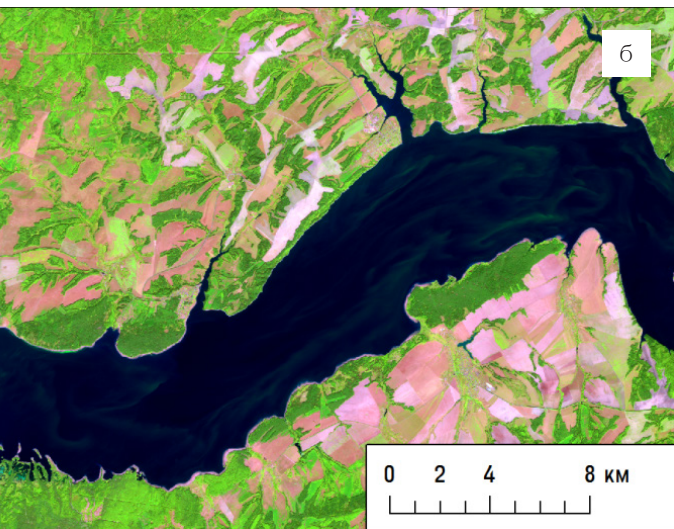
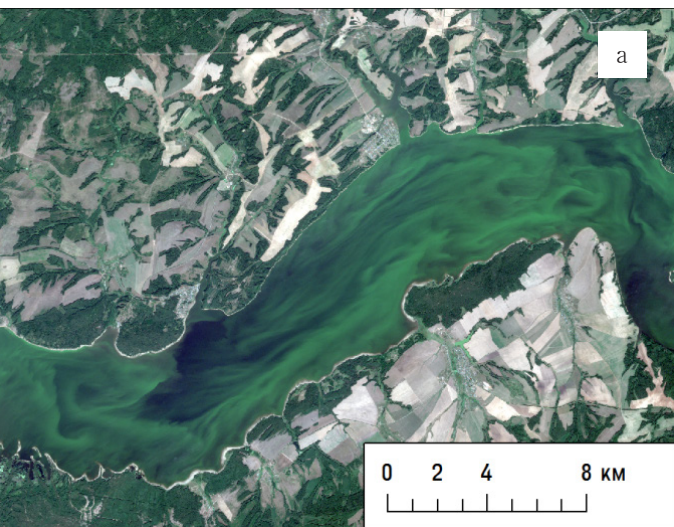


Рис. 3.11.16.
Цветение воды
в Воткинском
водохранилище
Снимок Sentinel-2
в синтезе
естественных
цветов (а), и в
синтезе
SWIR-NIR-RED (6)

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, содержа-

щими 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 [3].

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. 3.11.17). 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 вода будет иметь голубовато-зеленый оттенок и плохо отличается от мутной воды.

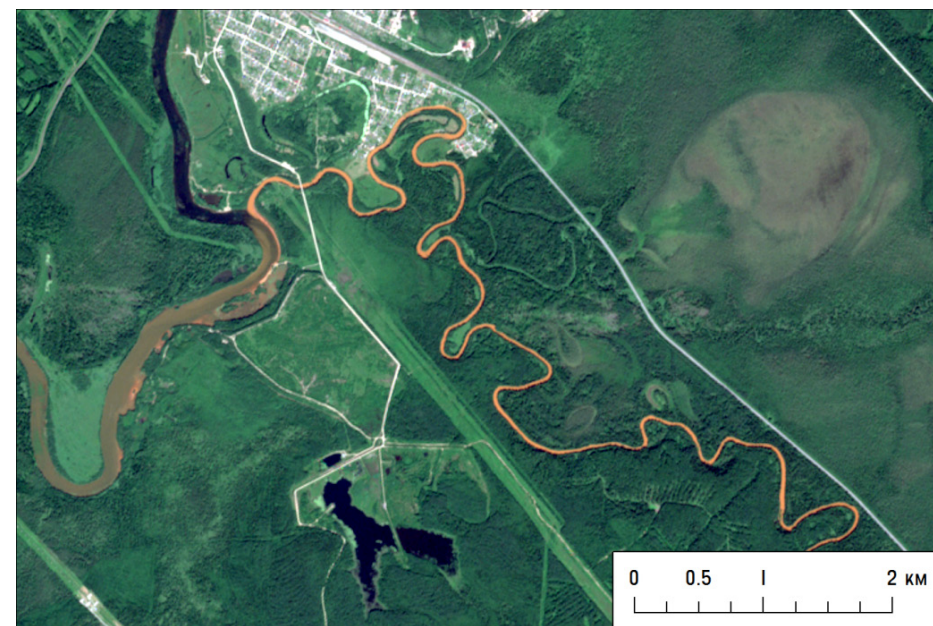


Рис. 3.11.17. Загрязнение реки кислыми водами с высокой концентрацией железа, изливающимися из затопленных шахт Кизеловского угольного бассейна. Снимок Sentinel-2 в синтезе естественных цветов

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 тепло-

вого загрязнения может быть обнаружен по снимкам теплового диапазона спектра, полученным в период, когда естественная температура воды в водоеме достаточно низкая, например, поздней осенью (рис. 3.11.18). В этом случае температура водной массы вблизи источника подогретых вод будет иметь больший контраст с водой, сохраняющей естественный температурный режим водоема.

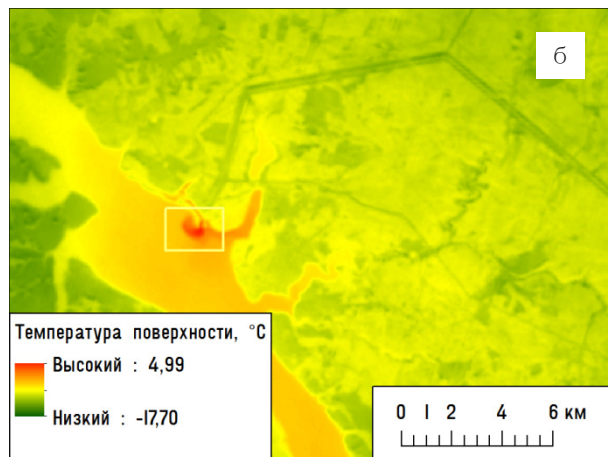
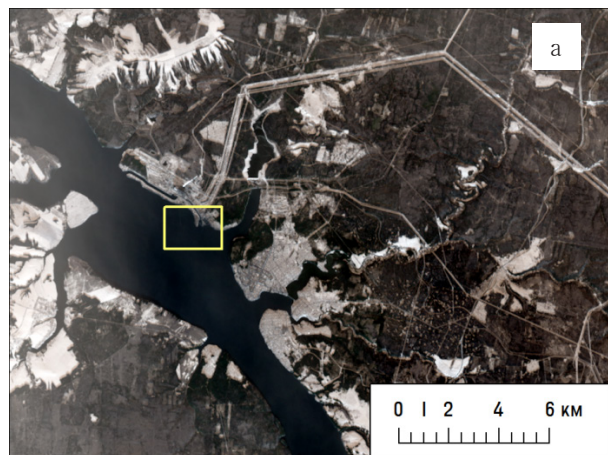


Рис. 3.11.18. Тепловое загрязнение Камского водохранилища вблизи ГРЭС. Снимок Landsat-8 в синтезе естественных цветов (а), и радиояростная температура поверхности в тепловом канале (б), источник сброса подогретых вод выделен прямоугольником

Загрязнение атмосферного воздуха по космическим снимкам обычно не изучается, поскольку лишь некоторые виды загрязнения существенно изменяют оптические свойства атмосферы. Это относится в первую очередь к дымовым эмиссиям от лесных пожаров (см. раздел 3.7). Высокое загрязнение атмосферы сажей и другими взвешенными веществами может вызвать также изменение оптических свойств снежного покрова (см. раздел 3.3), а загрязнение диоксидами серы и азота – гибель лесной растительности. Непосредственно по спутниковым снимкам можно обнаружить

только крупные стационарные источники выбросов в атмосферу в том случае, если они выбрасывают (помимо прочих газов) значительный объем водяного пара. Такие источники хорошо видны на снимках, особенно полученных в зимний период при морозной малооблачной погоде (рис. 3.11.19).

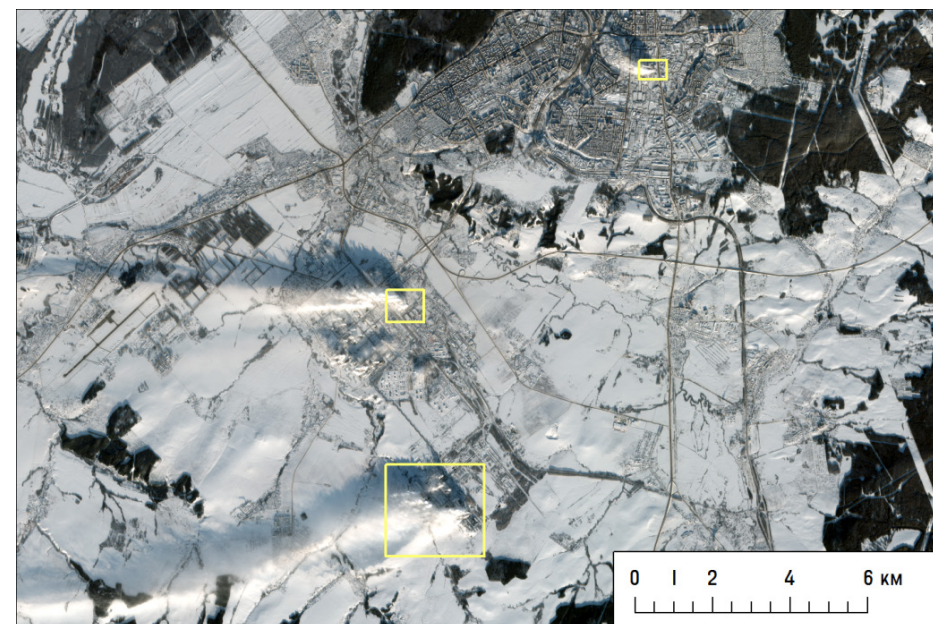


Рис. 3.11.19. Стационарные источники выбросов в атмосферу (выделены прямоугольниками) Снимок Sentinel-2, полученный в зимний период, в синтезе естественных цветов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный этап развития методов и технологий обработки и анализа данных ДЗЗ (в том числе космической съемки) характеризуется выраженным трендом на автоматизацию. За последние годы было разработано множество новых методов автоматизированного анализа изображений. Наиболее перспективными из них являются алгоритмы, основанные на искусственном интеллекте (моделях машинного обучения). Появление таких алгоритмов в совокупности с ростом пространственного и временного разрешения данных ДЗЗ позволяет решать на их основе принципиально новые задачи как научного, так и практического характера.

Однако, несмотря на отмеченный тренд на автоматизацию, роль человека (специалиста-дешифровщика, картографа) в процессе анализа данных ДЗЗ остается ключевой, повышаются лишь требования к его квалификации. Во-первых, для обучения современных алгоритмов автоматизированного распознавания требуется иметь значительный по объему тренировочный набор данных. Во многих случаях (за исключением наиболее простых), такая выборка может быть создана только специалистом, имеющим представление о дешифровочных признаках рассматриваемого объекта. И во-вторых, ни одна современная модель машинного обучения пока не способна учитывать весь комплекс дешифровочных признаков (включая косвенные, контекстные признаки) при анализе изображений. При этом для распознавания многих объектов, процессов и явлений эти признаки являются ключевыми.

Исходя из этого, авторы рассчитывают, что настоящее учебное пособие будет представлять интерес для широкого круга специалистов, использующих данные космической съемки и различные приемы их дешифрирования для решения научных и практических задач.

Также считаем необходимым выразить благодарность экспертам Федерального учебно-методического объединения в системе высшего образования по наукам о Земле – д.г.н. В. И. Кравцовой и к.г.н. Е. А. Балдиной за многочисленные ценные замечания к данному пособию».

ЛИТЕРАТУРА

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Потапов П.В., Турубанова С.А., Ярошенко Ф.Ю. Леса России – преобладающие группы древесных пород и сомкнутость древесного полога. М., ИКИ РАН, ЦЭПЛ РАН, Гринпис России, 2004. (Карта, М 1:14000000).
3. Березина О.А., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Применение многолетних рядов данных космической съёмки для оценки экологической ситуации в угледобывающих районах (на примере ликвидированного Кизеловского угольного бассейна) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. №2. С. 144–158.
4. Гаврилюк Е.А., Ершов Д.В. Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т9. №4. с. 15–23.
5. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / Под ред. А.М. Берлянта и А.В. Кошкарёва. – М.: ГИС-Ассоциация, 1999. 204 с.
6. Гляциологический словарь / Под ред. В. М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 527 с.
7. Девятова Н.В., Ершов Д.В., Лямцев Н.И., Денисов Б.С. Определение масштабов усыхания хвойных лесов Европейского севера России по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 2. С. 204–211.

8. Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков: Методика и результаты. – М.: Наука; Берлин: Академи-ферлаг, 1982. 84 с.
9. Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков: Сканирующая система «Фрагмент». Методика и результаты. – М.: Наука; Берлин: Академи-ферлаг. 1988, 124 с.
10. Дубинин М.Ю. NDVI – теория и практика. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения – 13.05.2019).
11. Изображения Земли из Космоса: примеры применения. Научно-популярное издание. М., Инженерно-технологический центр «СканЭкс», 2005. 100 с.
12. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (дата обращения – 13.05.2019).
13. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: учебник. М., Издательский центр «Академия», 2011. 416 с.
14. Космические методы геоэкологии. Атлас / под ред. В.И. Кравцовой. М., Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 1998. 108 с.
15. Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. М., Аспект Пресс, 2005. 199 с.
16. Кравцова В.И., Митькиных Н.С. Устья рек России. Атлас космических снимков / Под ред. В.Н. Михайлова. – М.: Научный мир, 2013. 124 с.
17. Краснопевцев Б.В. Фотограмметрия. – М.: УПП «Репрография» МИИГАиК, 2008. 160 с.
18. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. – М.: Изд. АН СССР, 1947. 271 с.
19. Крылов А.М., Владимирова Н.А. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки // Геоматика. 2011. № 3. С. 53 – 58.
20. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Аспект-Пресс, 2004. 184 с.

21. Межуниверситетский аэрокосмический центр. Электронный ресурс. URL: <http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/centre.htm> (дата обращения – 13.05.2019).
22. Попов Ю.В., Пустовит О.Е. Курс «Общая геология». Учебное пособие к разделу «Континентальные склоновые процессы и отложения» - Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2016. 48 с.
23. Савиных В.В., Цветков В.Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. – М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 2001. 228 с.
24. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 148 с.
25. Хамедов В.А., Копылов В.Н., Полищук Ю.М., Сугаипова А.Н., Шимов С.В. Создание карты лесов Ханты-Мансийского округа на основе космических снимков среднего разрешения. VI Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса». 2008. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_conf_pdf/E/Xamedov.pdf
26. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. 560 с.: ил.
27. Baumann M., Ozdogan M., Wolter P.T., Krylov A.M., Vladimirova N.A., Radeloff V.C. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance // Remote Sensing of Environment, 2014. Vol. 143, PP. 171–179.
28. Krylov A., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M.C., McCarty J.L. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // Environmental Research Letters. 2014. Vol. 9 (10). Article number 105007.
29. LANDSAT-8 Bands. Электронная версия. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/> (дата обращения – 10.04.2020)
30. LANDSAT-8 Base Combinations. URL: http://www.geocarto.com.hk/edu/PJ-BCMBLSAT/main_BCLS.html (дата обращения – 10.04.2020)
31. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. (2019) Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia). Earth System Science Data, Vol. 11(1), PP. 409–420.
32. SENTINEL-2 BANDS. Электронный ресурс: <https://eos.com/sentinel-2/> (дата обращения – 10.04.2020)

33. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 204. PP. 553–567.
34. Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing. Электронная версия. URL: <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9309> (дата обращения – 10.04.2020)
35. Wang X., Wang J., Che T., Huang X., Hao X., & Li H. Snow Cover Mapping for Complex Mountainous Forested Environments Based on a Multi-Index Technique. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018, 11(5): 1433–1441. doi: 10.1109/JSTARS.2018.2810094.
36. Xu, H. Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing, 2006. 27(14), P. 3025– 3033.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

ШИХОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ
 ГЕРАСИМОВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ
 ПОНОМАРЧУК АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ
 ПЕРМИНОВА ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА

ТЕМАТИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО
 РАЗРЕШЕНИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕДАКТОР Л.Г. ПОДОРОВА
 КОРРЕКТОР Л.И. ИВАНОВА
 КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА А.Н. ТАШКИНОВА

Объем данных 49,6 Мб
 Подписано к использованию 09.06.2020

Размещено в открытом доступе на сайте www.psu.ru
 в разделе НАУКА / Электронные публикации
 и в электронной мультимедийной библиотеке ELiS

Издательский центр Пермского государственного
 национального исследовательского университета
 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15