

А.С. Черепанов (Компания «Совзонд»)

В 2005 г. окончил Курганский государственный университет, в 2008 г. – аспирантуру МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности «картография». С 2006 г. работает в компании «Совзонд», в настоящее время – старший инженер по тематической обработке данных ДЗЗ. Кандидат географических наук.

Технология выявления медленных изменений в лесах по мультиспектральным космическим снимкам (на примере вымокания лесов)

Ранняя диагностика изменения состояния лесов является одной из эффективно решаемых задач с помощью методов дистанционного зондирования. Рассмотрим решение этой задачи на примере проблемы вымокания лесов, характерной для равнинных, слабо дренированных районов, с неглубоким залеганием грунтовых вод и достаточным увлажнением. В большой степени она проявляется в обширных районах Западно-Сибирской равнины. В условиях повышенной обводненности грунтов, а на большей части территории и заболоченности, прокладка автомобильных дорог, магистральных нефте- и газопроводов требует возведения высоких насыпей. Это приводит к нарушению гидрологического режима, и, как результат, к вымоканию и деградации лесных массивов.

В результате геоботанических исследований в Западной Сибири А.В. Абросимовым и И.В. Шиловой в 2003–2005 гг. были выделены 4 стадии вымокания мелколиственных лесов [1].

1-я стадия. Практически здоровый лес. Леса на этой стадии мало чем отличаются от лесных массивов, не подверженных вымоканию. Древос-
той не нарушен, лишь в некоторых местах име-

ются признаки угнетения листвы деревьев и переувлажнения. Почва не имеет внешних признаков засоления. Травяная растительность представлена видами, характерными для березовых злаково-разнотравных лесов (рис. 1).



Рис. 1.
Березовый лес. 1-я стадия вымокания



Рис. 2.
Березовый лес. 2-я стадия вымокания



Рис. 3.
Березовый лес. 3-я стадия вымокания

2-я стадия. Характеризуется частичным повреждением деревьев березы повислой: около половины из них имеют листву с признаками угнетения и сухие вершины. Некоторые деревья полностью лишены листвы. В почвенном профиле в результате подъема грунтовых вод возникает осолоделый слой, что говорит о начале засоления почв. В травяном покрове появляются виды, характерные для влажных лесов и болотистых мест (например, лабазник вязолистный) (рис. 2).

3-я стадия. Деревья полностью лишены листвы. Имеются признаки разрушения древесины, о чем свидетельствуют упавшие стволы деревьев. Проявляются признаки заболачивания. В травяном покрове преобладают виды, характерные для влажных лугов и болот (например, осока береговая). Идут процессы засоления почв, в результате чего в почве появляется осолоделый слой (A_2) мощностью 15–20 см, имеющий характерную белесую окраску (рис. 3).

4-я стадия. Происходит замена одной экосистемы на другую. Характеризуется полным исчезновением древесной растительности. Травяной покров составляют виды, характерные для болот (осока береговая, рогоз, тростник). Слой солоды в почвенном профиле достигает мощности 30–35 см. На месте леса возникают заболоченные территории (рис. 4).

Такие серьезные изменения, происходящие в природном комплексе, должны приводить к изменению его спектральной отражательной способности. Следовательно, должно изменяться изображение лесов на

космических снимках. Это определяет возможность использования космических снимков для определения и выделения участков с ослабленным и усыхающим лесом.

РАЙОН РАБОТ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Материалами для исследовательских работ послужили результаты наземных обследований на ключевых участках Курганской области (рис. 5), разновременные



Рис. 4.
Березовый лес. 4-я стадия вымокания

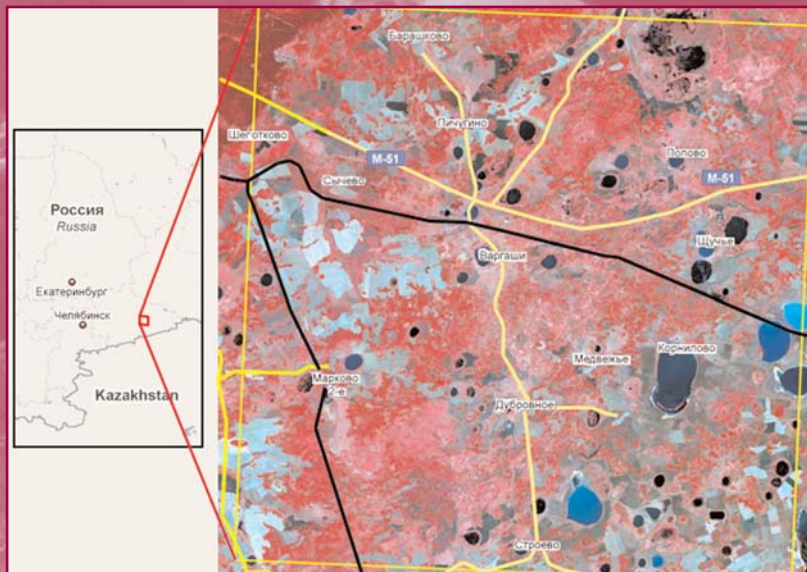


Рис. 5.
Район проведения исследования

мультиспектральные космические снимки, полученные отечественными и зарубежными космическими аппаратами (КА) – «Ресурс-О», Landsat-3, Landsat-4, Landsat-5, Landsat-7, Terra и ALOS, топографические и тематические карты (ландшафтные, геоморфологические, геологические и др.). При этом данные с КА Terra/ASTER и ALOS/AVNIR-2 были выбраны в качестве основы для спектрального анализа и картографирования вымокающих лесов. Снимки прошли радиометрическую и геометрическую коррекцию, а также было устранено влияние атмосферы.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СНИМКОВ

Геометрическая коррекция. Необходимость геометрической коррекции снимков с учетом рельефа при исследовании лесов диктуется малыми размерами контуров и необходимостью выявления изменений их границ во времени по снимкам с разных КА, полученных под разными углами съемки. Для геометрической коррекции снимков выполнено ортотрансформирование с учетом цифровой модели рельефа местности

SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). В качестве источника опорных точек использовались уже ортотрансформированные снимки Landsat-7/ETM+ (панхроматические) с пространственным разрешением 15 м (для пространственной привязки снимков с КА Landsat/MSS, «Ресурс-О»/МСУ-Э) и наземные опорные точки, полученные с помощью двух приемников GPS Javad Top Hiper (использовались для ортотрансформирования снимков с КА Terra/ASTER и ALOS/AVNIR-2). Результирующая по-

грешность положения ортотрансформированных изображений с использованием опорных точек со снимков с КА Landsat-7/ETM+ лежит в пределах 50 ± 30 м, что обеспечивает создание карт в масштабе 1:200 000. Погрешность положения ортотрансформированных изображений с использованием наземных опорных точек лежит в пределах 10 ± 5 м, что обеспечивает создание карт в масштабе 1:25 000.

Радиометрическая коррекция и устранение влияния атмосферы. Использование спектральной информации с космических снимков при проведении количественного анализа требует выполнения радиометрической коррекции снимков и устранения влияния атмосферы. Конструкция большинства космических съемочных систем такова, что в пределах их чувствительности (интервала между минимальным и максимальным уровнем регистрируемого излучения) существует линейная зависимость между цифровыми значениями яркости пикселей снимка и яркостью соответствующих площадок земной поверхности. Зная минимальный и максимальный уровень значений регистрируемого устройства излучения, можно с небольшой

погрешностью восстановить физические величины яркости. При соблюдении линейного закона передачи значений яркости расчет значений яркости мультиспектральных снимков в оптическом диапазоне осуществляется по простой формуле:

$$B_{\lambda} = K_{\lambda} \cdot DN + C_{\lambda},$$

где B_{λ} – энергетическая яркость для спектральной зоны, K_{λ} – калибровочный коэффициент, DN – «сырые» значения яркости, C_{λ} – калибровочная константа, соответствующая минимальной величине регистрируемой яркости.

Для радиометрической коррекции снимков с КА Landsat-5/TM, Landsat-7/ETM+, Terra/ASTER, ALOS/AVNIR-2 использовались значения калибровочных коэффициентов и констант, распространяемые вместе со снимками в файле с метаданными.

Для атмосферной коррекции снимков использовался модуль FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) для программного комплекса (ПК) ENVI, который позволяет выполнять атмосферную коррекцию снимков, полученных любыми мультиспектральными или гиперспектральными оптико-электронными системами [2]. С помощью данного модуля была выполнена атмосферная коррекция снимков с КА Landsat-5/TM, Landsat-7/ETM+, Terra/ASTER, ALOS/AVNIR-2. В ходе коррекции значения спектральной яркости, зафиксированные съемочной аппаратурой, были переведены в коэффициенты отражения, которые могли быть зафиксированы у земной поверхности полевым спектрометром.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

При работе с мультиспектральными снимками часто прибегают к созданию так называемых «индексных» изображений. На основе комбинации значений яркости в определенных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчета по этим значениям «спектрального индекса» объекта, строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние. Спектральные индексы, используемые для изучения и оценки состояния растительности, получили общепринятое название вегетационных индексов. Такой же подход был применен и к выделению вымокающих лесов, для чего были проанализированы вегетационные индексы, расчет которых возможен по мультиспектральным снимкам.

На основе данных наземных обследований в пределах участков, находящихся на разных стадиях вымокания, на снимках с КА Terra/ASTER и ALOS/AVNIR-2 выделялись

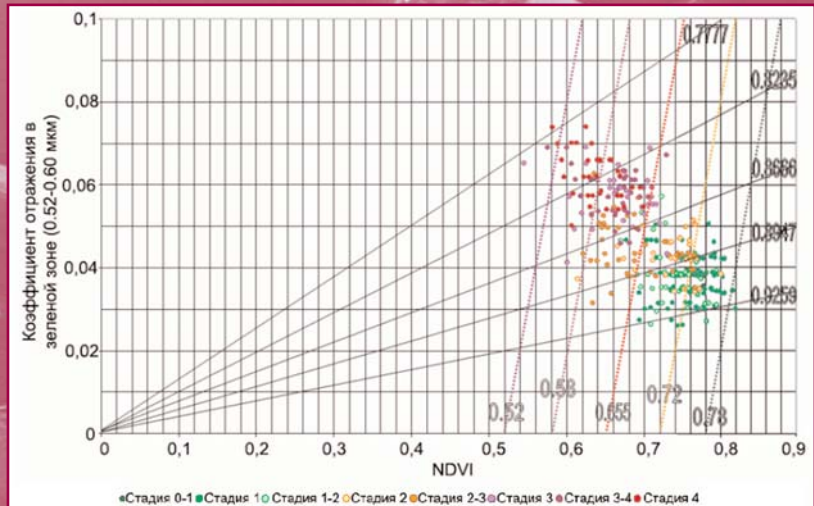


Рис. 6.

График связи значений индекса NDVI со значениями коэффициентов отражения в зеленой зоне. Снимок ALOS/AVNIR-2. Сплошными линиями показаны изовегетационные линии индекса их отношения ($NDVI / \rho_{зел}$), пунктирными – изовегетационные линии индекса их разности ($NDVI - \rho_{зел}$). Цифры – значения индекса

площадки размером 2-6 пикселей. По значениям яркости (без атмосферной коррекции) и коэффициентов отражения (полученных при коррекции влияния атмосферы) этих участков были рассчитаны 12 видов индексов (RVI, NDVI, IPVI, DVI, SAVI, mSAVI, NDII, MSI и др.) в Excel. Для оценки возможности использования вегетационных индексов при выделении вымокающих лесов было построено более 200 графиков связи значений рассматриваемых индексов со значениями коэффициентов спектральной яркости в разных зонах спектра. По оси x откладывались значения индексов, которые характеризовали общее состояние растения, по оси y – значения яркости и коэффициентов отражения в разных спектральных зонах. Анализ графиков показал, что существующие индексы, используемые в аэрокосмическом зондировании, мало пригодны для выделения мелколиственных лесов на разных стадиях вымокания. Индексы, в основе которых лежит соотношение яркостей в красной и ближней инфракрасной зонах, слабо отличаются друг от друга по информативности, фактически они идентичны. Существенные различия наблюдаются только между разностными (DVI) и относительными (NDVI, RVI) индексами [3].

При анализе особенностей спектральных характеристик вымокающих лесов на разных стадиях деградации были выявлены связи между значениями коэффициентов отражения в зеленой зоне с одной стороны и красной и ближней инфракрасной зонах (представленных в NDVI) – с другой, позволяющие разделить стадии вымокания. Связь значений индекса NDVI со значениями коэффициентов отражения в зеленой зоне, рассчитанными по снимку с КА ALOS/AVNIR-2, показана на графике (рис. 6). Стадии вымокания на этом графике разделяются изовегетационными линиями (линии, соединяющие одинаковые значения рассчитываемого индекса) с различными значениями индекса вымокания.

В результате предложен новый индекс, описывающий эту связь – *индекс вымокания* для выделения вымокающих лесов и их разделения по стадиям деградации, один из вариантов которого можно представить в виде:

$$\frac{(NDVI - \rho_{ЗЕЛ})}{(NDVI + \rho_{ЗЕЛ})}$$

где $NDVI = \frac{\rho_{БИК} - \rho_{КР}}{\rho_{БИК} + \rho_{КР}}$, $\rho_{ЗЕЛ}$ – коэффициент

отражения в зеленой зоне спектра; $\rho_{КР}$ – коэффициент отражения в красной зоне спектра; $\rho_{БИК}$ – коэффициент отражения в ближней инфракрасной зоне спектра.

Был выполнен расчет значений индекса по снимкам с КА Landsat-5/TM, Landsat-7/ETM+, Terra/ASTER, ALOS/AVNIR-2 и для разделения деградации вымокающих лесов на четыре стадии были установлены следующие интервалы значений *индекса вымокания*.

- 0,89–0,93 (1-я стадия);
- 0,87–0,89 (2-я стадия);
- 0,82–0,87 (3-я стадия);
- 0,76–0,82 (4-я стадия).

Для расчета предложенного индекса была создана подпрограмма к ПК ENVI, позволяющая автоматически выполнять эту операцию.

МЕТОДИКА КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

Для оценки вымокания лиственных лесов было предусмотрено поэтапное составление карт следующих видов:

- *динамика распространения лиственных лесов;*
- *вымокающие лиственные леса на разных стадиях деградации.*

Карты динамики распространения лиственных лесов необходимы для получения границ контуров леса, существовавших на рассматриваемой территории за анализируемый промежуток времени (с 1987 по 2006 гг.) и существующих в настоящее время.

Предлагаемая методика автоматизированного картографирования вымокания лесов предусматривает следующие этапы, основные из которых представлены на рис. 7:

- предварительная подготовка космических снимков к автоматизированному дешифрированию;
- автоматическое выделение лиственных лесов на разновременных снимках;
- фильтрация избыточно мелких контуров и автоматическая векторизация границ лиственных лесов;
- создание карты динамики распространения лиственных лесов;
- разделение лесов по стадиям вымокания и создание карты вымокающих лиственных лесов на разных стадиях деградации.

На этапе **предварительной подготовки космических снимков к автоматизированному дешифрированию** снимки прошли радиометрическую и геометрическую коррекцию, было устранено влияние атмосферы.

Автоматическое выделение лиственных лесов.

Для автоматического выделения лиственных лесов по каждому из разновременных анализируемых снимков с

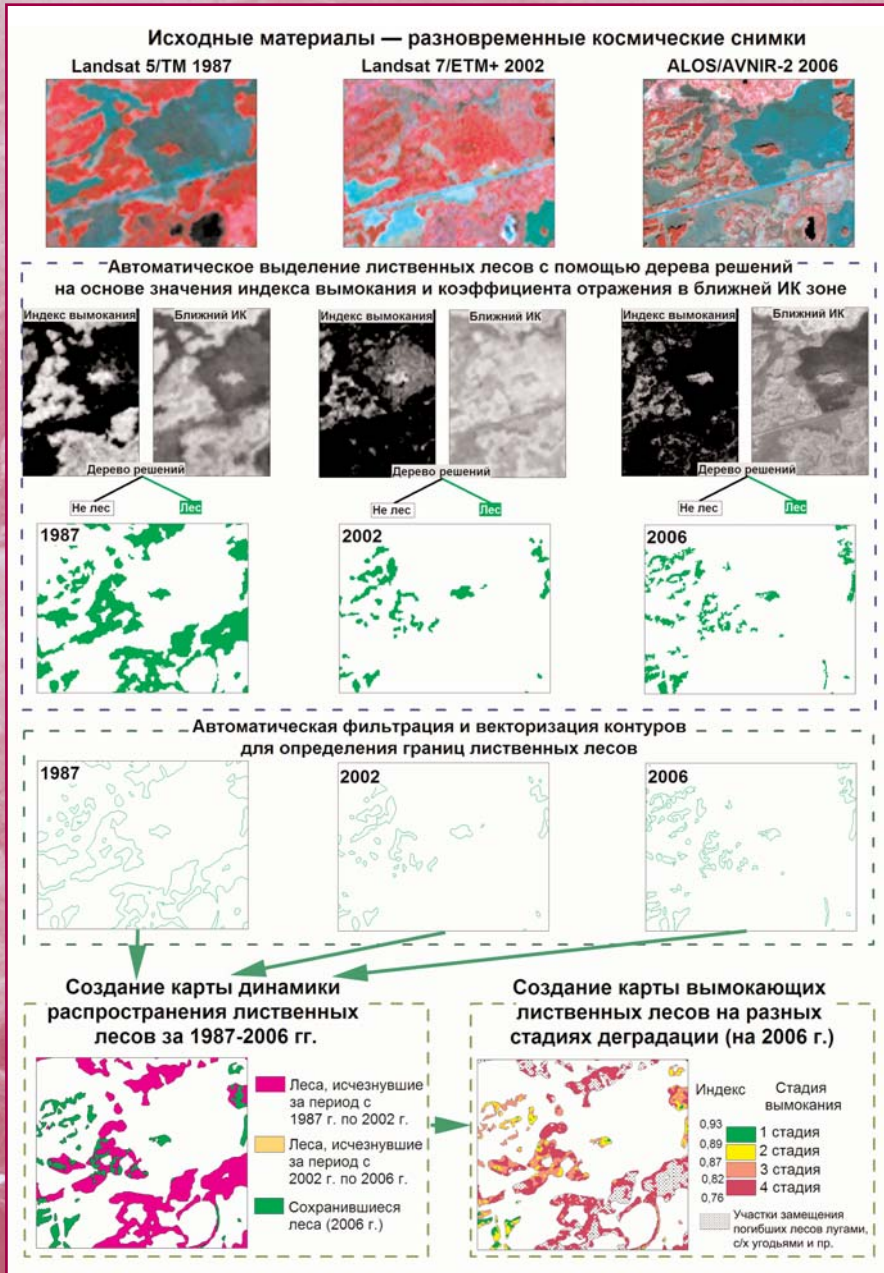


Рис. 7. Методика автоматизированного создания карт вымокания лесов

космических аппаратов Landsat-5/TM (1987 г.), Landsat-7/ETM+ (2002 г.) и ALOS/AVNIR-2 (2006 г.) были определены два параметра: значения предложенного индекса вымокания и коэффициента отражения лесов в ближней ИК зоне спектра. Полученные параметры использовались для альтернативного отнесения пикселей изображения к категориям «лес» (включает лиственные леса — здоровые, 1-й, 2-й и 3-й стадии вымокания) и «не лес» (включает остальные объекты) с помощью алгоритма, основанного на дереве решений. В результате этого этапа автоматической обработки на каждом из снимков были выделены участки лиственных лесов, т. е. практически составлены предварительные карты их распространения в 1987, 2002 и 2006 гг.

Фильтрация избыточно мелких контуров и автоматическая векторизация границ лиственных лесов. Поскольку в результате автоматической классификации на растровых изображениях остаются контуры размером 1–3 пикселя (10×10 – 10×30 м), то полученные изображения нуждаются в предварительной фильтрации мелких контуров с учетом масштаба создаваемой в конечном итоге карты. Эта процедура соответствует картографической генерализации, выполняемой при традиционном составлении карт. В соответствии с масштабом 1:25 000, минимальный размер показываемых площадных объектов должен быть не меньше 25×25 м (1 мм^2 в масштабе карты). Для топографических карт масштаба 1:25 000 принят размер показываемых контуров лесов 4 мм^2 , но, учитывая, что создается не топографическая, а специальная (тематическая) карта, требования повышены до 1 мм^2 .

Для дальнейшего анализа полученных разновременных карт лесов и создания карты изменений их распространения требуется перейти от растрового изображения к карте в векторном формате, более удобном для применения количественных методов и средств анализа пространственной информации.

Для фильтрации и автоматической векторизации изображения использовались дополнительные подпрограммы к ПК ENVI. Выполнение фильтрации целесообразно проводить в два этапа. На первом этапе фильтрации устраняются мелкие выделы лиственных лесов (9 пикселей, т.е. 30×30 м), на втором — пустоты внутри выделов лиственных лесов (18 пикселей). Такие различия обусловлены большей значимостью участков леса по сравнению с другими объектами. Полученное отфильтрованное от избыточно мелких деталей изображение автоматически векторизуется.

Создание карты динамики распространения лиственных лесов. После обработки результатов автоматической классификации путем фильтрации с последующей векторизацией контуров получены границы лиственных лесов в векторном формате на три временных среза — 1987, 2002, 2006 гг. Эти границы необходимы для получения общего контура лиственных лесов, существовавших на данной территории за интервал времени с 1987 г. по 2006 г., и дальнейшей оценки площадей вымокания. При этом границы 1987 г. и 2006 г. рассматриваются как основные. Границы 1987 г. отражают максимальную площадь лесов, которые, по утверждению очевидцев, начали быстро деградировать в конце 1980-х гг., а границы лесов на 2006 г. отражают современное распространение лесов. Границы лесов 2002 г. использовались как промежуточный срез; в большинстве районов они совпадают или близки к границам лесов 2006 г. В пределах общего контура лесов 1987, 2002 и 2006 гг. проводилось разделение лиственных лесов по стадиям вымокания. Путем поочередного вычитания из общего контура границ 2006 г. и 2002 г. были получены участки лиственных лесов, исчезнувших за период с 1987 по 2002 гг., с 2002 по 2006 гг., а также современные границы лесов (на 2006 г.).

После совмещения всех границ на три срока были повторно удалены мелкие контуры, возникшие при пересечениях разновременных границ, которые не соответствовали цензу отбора для карты данного масштаба. Для оценки качества полученных контуров результаты сопоставлялись со снимками, имеющимися на эту территорию и не использовавшимися в процессе классификации с КА: Ресурс-О/МСУ-Э, IRS/LISS-3, Landsat-5/TM, Landsat-7/ETM+ и Terra/ASTER.

Разделение лесов по стадиям вымокания. В пределах общего контура лиственных лесов по снимку ALOS/AVNIR-2 с помощью разработанной нами подпрограммы для ПК ENVI был рассчитан индекс вымокания. Снимок ALOS/AVNIR-2 выбран как основной, поскольку он имеет наилучшее пространственное разрешение.

Найденные интервалы значений были использованы для объединения пикселей индексного изображения в группы по 4 стадиям деградации. В результате в пределах границ лесов 1987–2006 гг. среди лиственных лесов были выделены 4 стадии вымокания.

1-я стадия. Практически здоровый лес с отдельными признаками угнетения деревьев. Значения индекса вымокания от 0,89 до 0,93.

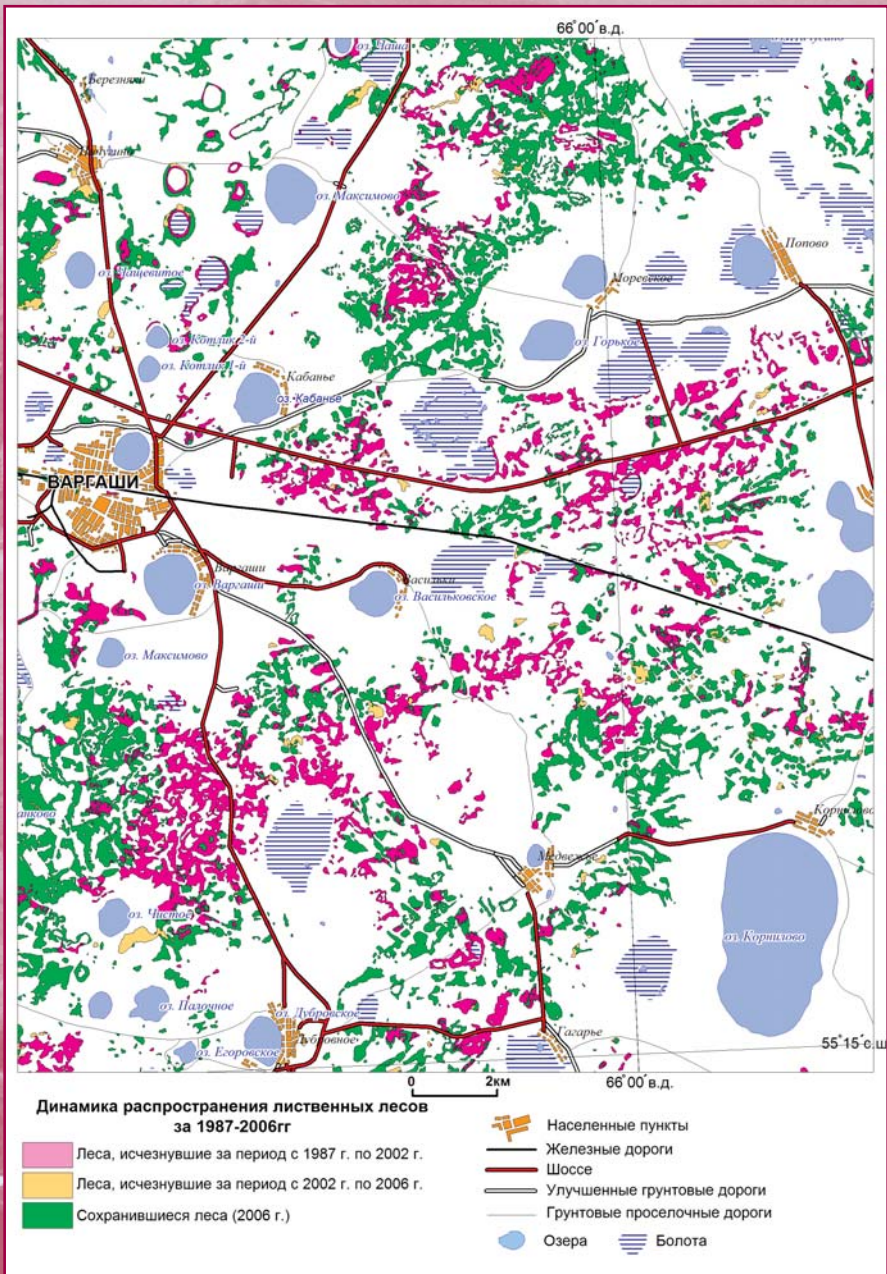


Рис. 8. Фрагмент карты «Динамика распространения лиственных лесов за 1987–2006 гг.», масштаб 1:200 000

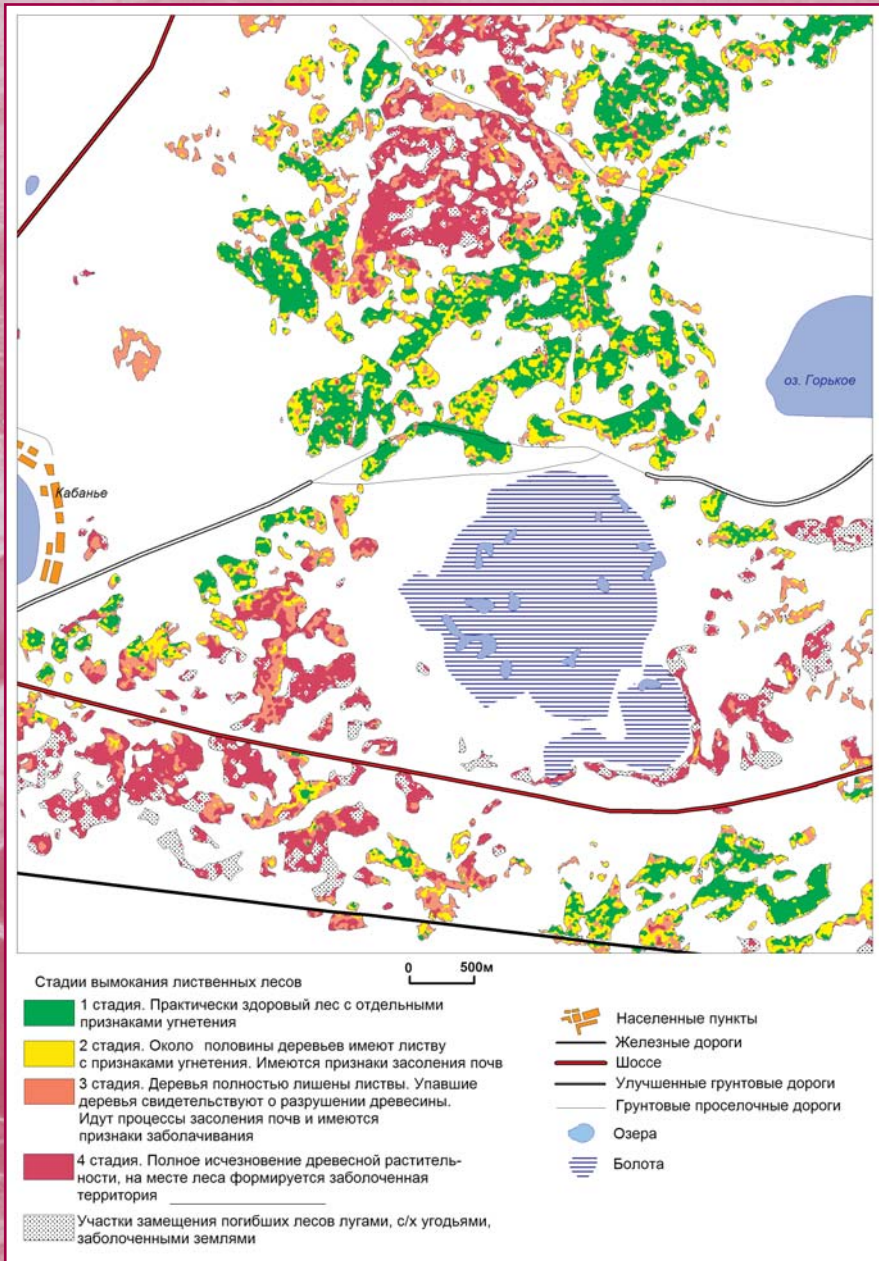


Рис. 9. Фрагмент карты «Вымокающие лиственные леса на разных стадиях деградации (на 2006 г.)», масштаб 1:50 000

2-я стадия. Половина деревьев имеют листву с признаками угнетения, у всех деревьев березы повислой сухие вершины. Имеются признаки засоления почв. Значения индекса вымокания от 0,87 до 0,89.

3-я стадия. Деревья полностью лишены листвы. Упавшие деревья свидетельствуют о разрушении древесины. Идут процессы засоления почв и имеются признаки заболачивания. Значения индекса вымокания от 0,82 до 0,87.

4-я стадия. Полное исчезновение древесной растительности, на месте леса формируются заболоченные территории. Значения индекса вымокания от 0,76 до 0,82.

Участки в пределах контура леса 1987–2006 гг., имеющие значения индекса выше или ниже указанных порогов, соответствуют либо районам полной деградации и замены лесной экосистемы болотами, либо могут являться районами вырубки леса и замены его сельскохозяйственными землями.

Для отображения стадий вымокания лесов на карте выбран способ качественного фона. Участки лесов на разных стадиях вымокания показаны оттенками разных цветов от зеленого для практически здоровых лесов до красного и малинового для деградировавших. Фрагменты карты динамики распространения лиственных лесов и карты вымокающих лиственных лесов на разных стадиях деградации представлены на рис. 8, 9 в масштабах 1:200 000 и 1:50 000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Достоверность полученных результатов разделения лесов по стадиям вымокания подтверждается полевыми наземными обследованиями более 300 эталонных участков, многократными натурными проверками результатов исследований на 50 контрольных участках.

Созданные карты «Динамика распространения лиственных лесов за 1987–2006 гг.» (рис. 8) и «Вымокающие лиственные леса на разных стадиях деградации (на

2006 г.)» (рис. 9) позволили впервые определить степень деградации и исчезновения лесов в результате процесса вымокания в пределах исследуемого участка. Площадь лесов исследуемого участка сократилась на 72 км², с 276 км² в 1987 г. до 204 км² в 2006 г., что составляет более 26% от первоначальной площади. Лиственные леса 1-й стадии вымокания занимают 42% от площади лиственных лесов на настоящий момент времени, 2-й стадии – 33%, 3-й стадии – 25%. Среди исчезнувших лесов (72 км²) доля лесов 4-й стадии составила 86%, оставшиеся 14% соответствуют районам вырубки леса и его замены сельскохозяйственными землями.

Главным фактором усыхания лесов в данном случае является антропогенный фактор, который проявляется, в основном, в виде объектов инфраструктуры (автодороги, железные дороги, насыпи, трубопроводы и т. д.). В районе представлено несколько транспортных систем. Федеральная автотрасса «Байкал» проходит с запада на восток и разделяет район на две части. От нее также отходят в радиальном направлении асфальтированные дороги. В результате район разбивается на несколько больших участков, разделенных транспортными линиями с насыпями. Кроме того, параллельно с федеральной автотрассой, на расстоянии 2 км от нее, проходит Транссибирская железная дорога. Участки лиственных лесов между автотрассой и железной дорогой оказались наиболее пострадавшими.

В заключение следует отметить, что гибель лесов в результате вымокания по форме внешнего проявления – усыхание, уменьшение количества хлорофилла, пожелтение, изменение структуры листвы, мало отличается от усыхания лесов в результате других воздействий – поражение болезнями, деградация в результате токсических воздействий. В соответствие с этим можно говорить о возможности применения изложенной методики, с внесением определенных изменений, к другим медленным негативным процессам, происходящим в лесах.

Список литературы

1. Абрисимов А.А., Абрисимов А.В. Антропогенное вымокание лесов Курганской области по данным полевых и дистанционных исследований // Природопользование в районах со сложной экологической ситуацией. – Тюмень, 1999. – С. 86–88.

2. Болсуновский М.А, Черепанов А.С. Атмосферная коррекция в ПО ENVI. Модуль FLAASH // Геопроектирование. – 2006. – № 5. – С. 22–24.

3. Черепанов А.С. Методика картографирования вымокания лесов по космическим снимкам (на примере территории Курганской области). Автореферат канд. дисс. // МГУ им. М.В. Ломоносова геогр. фак. – М., 2008.