Организация обработки данных ДЗЗ при решении задачи детектирования изменений лесного покрова на больших территориях

А. В. Кашницкий, Т. С. Ховратович, И. В. Балашов

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: kashnizky@gmail.com*

В статье описан специализированный блок обработки спутниковых данных, разработанный для детектирования изменений лесного покрова, в первую очередь связанных с вырубкой леса. Этот блок реализует ранее предложенный метод детектирования изменений лесного покрова по спутниковым данным систем Landsat и Sentinel-2 и основан на применении программных решений на базе облачных технологий, при котором весь необходимый объём спутниковых данных находится в центрах хранения, а обработка информации проходит удалённо с использованием распределённых ресурсов коллективного пользования. Предложенный блок обработки предоставляется исследователям в виде специального инструмента в составе информационной системы «ВЕГА-Приморье» и спутникового сервиса коллективного пользования «ВЕГА-Science». В статье описано, как с его помощью производится поиск, выбор, анализ и обработка данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из больших распределённых архивов. Отдельно рассказано о принципах объединения получаемых результатов в единую карту изменений лесного покрова. Экспериментальная апробация инструмента в ряде регионов продемонстрировала, что предложенный подход позволяет не только избежать передачи больших объёмов информации, но и значительно упростить обработку данных ДЗЗ в задаче детектирования вырубок леса. С помощью разработанного инструмента открываются возможности массового детектирования изменений лесного покрова в течение длительного времени и на большой территории, а также быстрого и независимого анализа данных о местах лесных вырубок в любом локальном регионе на территории России.

Ключевые слова: вырубки, выявление изменений, детектирование вырубок леса, дистанционное зондирование, информационные системы, мониторинг лесов, инструмент детектирования вырубок

Одобрена к печати: 01.11.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-103-111

Введение

Одной из важных задач спутникового мониторинга лесов является детектирование лесных вырубок. Ряд научных работ по использованию данных дистанционного зондирования для фиксации изменений в лесах России подтверждает наличие за последние годы значительных изменений лесного покрова из-за ряда факторов, в том числе вырубок (Барталев и др., 2015; Bartalev et al., 2013; Hansen et al., 2013; Potapov et al., 2015). Необходимость оперативной оценки состояния и динамики лесного покрова и огромная территория для инвентаризации являются причинами развития методов оценки лесного покрова по данным спутниковых наблюдений.

В Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) ранее был разработан метод детектирования изменений лесного покрова по спутниковым данным систем Landsat (прибор OLI) и Sentinel-2 (прибор MSI) (Ховратович и др., 2019а). Данный метод основан на использовании временной серии чувствительных к изменениям растительного покрова спектральных каналов спутниковых изображений двух последовательных годов и сравнении получаемых по ним оценок проективного покрытия древесного полога леса в пикселе. Оценки проективного покрытия рассчитываются на основе линейной модели спектральных смесей с двумя чистыми компонентами, соответствующими лесу и безлесным территориям. С помощью этого метода можно в автоматизированном режиме детектировать изменения, произошедшие в период между двумя выбранными снимками.

Однако при попытке применения данного метода на больших территориях и в течение продолжительного временного интервала возникает сложность в организации самой обработки данных. Например, по нашей оценке, для решения задачи детектирования лесных вырубок разработанным методом на территорию России только за последние два года потребуется анализ и обработка более чем 80 000 сцен спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/B общим объёмом более 300 Тбайт. Дополнительной проблемой является сложность маскирования облачности во всех случаях, что приводит к необходимости вручную задавать область обработки, свободную от облачности и теней. Кроме того, для уменьшения ошибок ложного детектирования, возникающих из-за различий величины снежного покрова, фенологического состояния растительности, освещённости на анализируемой паре сцен, полученные результаты выявления вырубок требуется подтверждать с помощью обработки временного ряда данных (Ховратович и др., 2019а). Отдельной задачей является детектирование выборочных вырубок или вырубок на затенённых склонах в местах с ярко выраженным рельефом (Ховратович и др., 2019б). С учётом всех этих факторов до сих пор не удаётся в полностью автоматическом режиме достоверно детектировать вырубки, и поэтому в большинстве случаев для решения задачи требуется наличие оператора.

При необходимости обработки большого объёма спутниковых данных в рамках поставленной задачи создание блока обработки к настольной геоинформационной системе (ГИС) не позволит за удовлетворительное время решить задачу. В таком случае весь объём информации придётся скачивать на машины исследователей, организовывать её хранение и обработку и потом проводить объединение полученных результатов. В современных условиях это невозможно в рамках ограниченных ресурсов, времени и бюджета. Поэтому мы предложили и реализовали решение на базе облачных технологий, при котором весь объём спутниковых данных находится в центрах хранения. При такой организации обработки данных исследователи проводят все операции поиска, выбора и анализа удалённо с использованием распределённых ресурсов коллективного пользования. Такой подход позволяет не только избежать передачи больших объёмов информации, но и значительно упростить и ускорить обработку данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в решаемой нами задаче детектирования вырубок леса.

В настоящей статье мы опишем специализированный блок обработки спутниковых данных, который реализует упомянутый выше метод детектирования изменений лесного покрова. Опишем, как с его помощью производится поиск, выбор, анализ и обработка данных ДЗЗ из больших распределённых архивов. Отдельно остановимся на работе с получаемыми результатами детектирования изменений и их объединении в единую карту вырубок.

Интерактивный инструмент детектирования изменений в лесу в составе информационных систем мониторинга

Описываемый блок обработки данных создан на базе ресурсов Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015). В центре имеется долговременный (с 1984 г. до настоящего времени) и ежедневно пополняемый архив данных спутниковых систем Landsat и Sentinel-2 на всю территорию Северной Евразии. Выбор данных систем Landsat и Sentinel-2 для решения задачи обусловлен пространственным разрешением в 10–30 м, оптимальным для детектирования сравнительно небольших по площади объектов, таких как вырубки, и наличием требуемых спектральных каналов в видимом красном, а также ближнем и среднем инфракрасном диапазонах. Кроме того, данные свободно распространяются, имеют хорошую географическую привязку и проверенные процедуры и методы предварительной обработки.

Также на базе ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» на основе решений, разработанных в ИКИ РАН ранее (Кашницкий и др., 2015), есть возможность создавать блоки обработки данных, позволяющие проводить достаточно сложную обработку информации из больших распределённых архивов. Интерфейс таких блоков предоставляется исследователям с помощью

веб-браузера в виде специализированных инструментов в составе информационных систем дистанционного мониторинга. Для контроля лесопользования на основе указанных решений нами был создан интерактивный инструмент детектирования изменений в лесу. Этот инструмент был внедрён в две крупные действующие информационные системы мониторинга:

- «ВЕГА-Приморье» (<http://primorsky.geosmis.ru/>) (Лупян и др., 2016) — информационная система, созданная для внедрения современных технологий дистанционного зондирования Земли из космоса для комплексного мониторинга лесов с целью обеспечения максимально полного использования их ресурсно-экологического потенциала, повышения эффективности их охраны, защиты и сохранения уникального биологического разнообразия лесной флоры и фауны;
- «ВЕГА-Science» — спутниковый сервис коллективного пользования, предназначенный для решения различных научных задач (<http://sci-vega.ru>) (Лупян и др., 2015).

Пользовательский интерфейс инструмента детектирования изменений

Как было указано выше, до сих пор не удаётся полностью в автоматическом режиме проводить детектирование во всех случаях и в предлагаемом нами решении требуется наличие оператора. Однако набор действий, которые необходимо проделать оператору, достаточно хорошо формализован и не требует глубоких знаний. В основном человеку нужно сделать выбор пригодных снимков и области обработки, а также контролировать результаты детектирования. При этом выполнение этих операций максимально упрощено и не требует скачивания больших объёмов информации. Так, например, выбор снимков сводится к простому перебору доступных данных в веб-интерфейсе. В связи с этим необходимость участия в обработке человека не является препятствием к массовому детектированию изменений в лесном покрове.

Основные этапы алгоритма детектирования и картографирования обнаруженных изменений показаны на *рис. 1* (см. с. 106). Инструмент реализует следующую процедуру анализа:

- с помощью картографического веб-интерфейса осуществляется подбор снимков и области, на которой будет произведена обработка (требуется работа оператора);
- задаются параметры процедуры детектирования изменений (работа оператора требуется только в ряде случаев);
- на выбранной паре снимков в автоматическом режиме детектируются изменения в лесном покрове;
- проверяется корректность результатов, и они заносятся в базу данных (требуется работа оператора).

После этого осуществляется переход к новой области или подбор других снимков для создания нового задания.

При запуске процедуры детектирования оператор управляет следующими параметрами:

- *спутниковые данные*. Процедура поддерживает работу со спектральными каналами в видимом красном, а также ближнем и среднем инфракрасном диапазонах спутниковых систем Landsat и Sentinel-2. На странице поиска реализовано быстрое добавление входных данных в качестве параметра и автоматический выбор необходимых спектральных каналов. Выбранные спутниковые данные должны быть одного типа, по возможности свободны от облачности и теней и получены максимально близко по времени за разные годы;
- *обучающая выборка*. Опорные точки двух классов «лес» и «безлесные территории» являются необязательным параметром алгоритма. В случае выбора параметра точки могут быть расставлены автоматически с помощью карты лесов по данным спутника Proba-V (Егоров и др., 2018) или вручную пользователем;

Рис. 1. Основные этапы алгоритма детектирования изменений в лесном покрове: 1 — снимок Landsat на 22.01.2015; 2 — снимок Landsat на 25.01.2016; 3 — автоматическое создание обучающей выборки по данным Proba-V, внешний вид инструмента при создании задания; 4 — результат работы инструмента детектирования; 5 — контуры детектированных вырубок в базе данных за 2015 и 2016 гг., полученные по нескольким обработкам

- *стратификация*. Стратификация территории по лесистости является необязательным параметром, отвечающим за более точную настройку порогов в зависимости от степени покрытия участка лесом;
- *порог разделения*. С помощью порога разделения на анализируемой разностной гистограмме выделяют значения, соответствующие произошедшим изменениям. Данный параметр задаётся в стандартных отклонениях от среднего значения и по умолчанию равен 2;
- *выбор дополнительных масок* (воды, облачности или заданных оператором). Для ограничения области, в которой происходит обработка, с помощью панели инструментов можно задать полигон произвольной формы. Также предоставляется возможность исключить из рассмотрения области, занятые водными объектами, задав соответствующий параметр;
- *выбор топографической коррекции*. Для минимизации влияния рельефа на значения коэффициентов спектральной яркости инструмент позволяет применять на этапе подготовки данных следующие модели топографической нормализации: C-factor, Cosine, Minnaert, Percent (Riano et al., 2003);
- *фильтрация результата*. В инструменте предусмотрена пространственная фильтрация построенного результата. Окно и способ сглаживания задаются при выборе данной опции.

Задав входные данные и необходимые параметры, исследователь запускает автоматическую процедуру детектирования изменений. Даты выбранных снимков определяют временной интервал для поиска изменений. Результат автоматической процедуры выделения изменений представляет собой растровую информацию, соответствующую попиксельно используемым исходным данным, в каждом пикселе которой содержится процент изменений в растительном покрове. После завершения процедуры обработки построенный результат отрисовывается на экране. Пользователь может получить визуализацию изменений лесного покрова разной величины, изменить параметры процедуры при неудовлетворительном результате, сохранить задание, включая результат с возможностью его загрузки в дальнейшем, или занести построенный результат в базу данных.

Схема организации распределённой обработки данных

Схема организации распределённой обработки данных для решения задачи детектирования изменений в лесу представлена на *рис. 2* (см. с. 108). Со стороны пользовательской информационной системы используется веб-браузер, таким образом, отсутствует необходимость в специальном программном обеспечении, своих вычислительных мощностях и средствах хранения. В процессе работы пользователь выбирает спутниковые данные для обработки, задаёт входные параметры и запускает автоматическую процедуру детектирования изменений. От пользователя системы скрыты преобразования, происходящие с данными, а также процессы выделения и использования различных распределённых вычислительных ресурсов. Как показано на схеме *рис. 2*, данные каждой сцены запрашиваются параллельно с серверов хранения, на которых происходят базовые преобразования информации. Затем на сервере, выделенном под проведение процедур обработки, подготовленные данные вместе с обучающей выборкой передаются отдельному модулю, реализующему метод детектирования изменений и написанному в соответствии с технологией, описанной в работе (Кашницкий и др., 2016). Основное время выполнения задания занимает работа этого модуля. Процесс обработки ведётся областями не более 30×30 км. Для таких размеров данных время выполнения задания от момента запуска до получения результата составляет до 3 мин. При этом предполагается, что пользователь не всегда должен дожидаться завершения текущего задания, а может сразу приступить к созданию набора данных следующего. После визуальной проверки пользователем полученного результата выявления изменений происходит его занесение в специальную базу данных.

Рис. 2. Схема организации распределённой обработки в задаче детектирования изменений в лесу

Занесение результатов детектирования в базу данных и визуализация контуров в интерфейсе информационной системы

База данных хранит информацию о выявленных изменениях в векторном виде. Первичными единицами, поступающими в базу данных, являются контуры пикселей, в которых обнаружены изменения. У каждого контура есть атрибуты, даты анализируемых сцен и величина изменения. Далее пиксели из обработки проходят два этапа: объединение контуров пикселей в полигоны-объекты и построение полигонов-изменений для объектов.

На первом этапе контуры поступающих пикселей объединяются сначала между собой, а затем и между уже имеющимися в базе данных полигонами с учётом максимальной удалённости в пространстве (0,5 км) и во времени (365 дней). Образующимся на этом шаге объектам присваивается номер, вычисляется их площадь и другие параметры. Геометрия объекта может состоять из нескольких контуров. В объект входят пиксели изменений, полученные по разным спутниковым сценам. Таким образом, объекту сопоставлены наблюдения его состояния в разные моменты времени. Если соседние объекты в процессе эволюции приближаются друг к другу и (или) пересекаются, то они объединяются в один объект.

На втором шаге на основе объектов строятся полигоны-изменения — для более быстрого и корректного вычисления и отрисовки изменений за задаваемый пользователем период. Полигоны-изменения для объекта содержат его прирост между ближайшими датами его состояний.

Этапы выполняются последовательно. После занесения результатов обработки может пройти до 10–15 мин, прежде чем это отобразится в картографическом интерфейсе информационной системы.

Для анализа результатов выявления изменений в информационной системе предусмотрена возможность визуализации всех построенных полигонов-объектов и полигонов-изменений за заданный пользователем период времени для рассматриваемой территории. Визуализация полигонов изменений сделана через усреднение на сетку и позволяет избежать артефактов отображения. Для удобства анализа в системе реализован инструмент, выдающий

информацию по клику в точке карты, который для отображаемого полигона-объекта выводит его площадь, тип и даты обработанных данных, а также среднюю величину изменения. Принципы хранения изменений в базе данных информационной системы позволяют каждому пользователю определять необходимую частоту обработки территории: чем чаще обработан участок, тем точнее границы и датировка произошедших изменений.

Заключение

В результате проделанных работ был создан достаточно универсальный интерактивный инструмент, с помощью которого открываются возможности массового детектирования изменений лесного покрова, произошедших в длительном интервале времени, а также быстрого и независимого анализа данных о местах вырубок в любом локальном регионе на территории России. Периодичность обработки территории может составлять год и менее и определяется только наличием свободных от облачности спутниковых данных Landsat-8 и Sentinel-2. Для использования инструмента не требуется скачивать на компьютер исследователя спутниковые данные и устанавливать дополнительное программное обеспечение.

Инструмент выявления изменений был опробован на тестовых участках в Приморском крае и республике Удмуртия (Ховратович и др., 2019а). Проведённое в указанной статье сравнение между полученными данными, официальной статистикой и другой информацией из открытых источников продемонстрировало, что инструмент можно использовать не только для детектирования сплошных, но и выборочных вырубок леса. Кроме того, проводились локальные эксперименты по его тестированию на вырубках в Татарстане, Кировской, Пермской, Иркутской областях и Хабаровском крае. В настоящее время с помощью предложенного инструмента было обработано 142 пары сцен, занесено в базу данных 38 575 выявленных изменений, на основе которых обнаружено 32 245 объектов вырубки леса, датированных 2014–2019 гг. База данных постоянно пополняется новыми изменениями.

Вносимые в базу данных результаты обработки визуально проверяются исследователем. Такой интерактивный метод массовой обработки позволяет исключить ошибки автоматической классификации и повысить качество заносимых в базу объектов. Построенные данные о вырубках леса могут применяться как для ежегодного статистического сравнения с отчётностью на уровне регионов и лесничеств, так и для проверки деклараций лесопользования, а следовательно, могут служить опорой для принятия решений по профилактике и контролю незаконных вырубок. Кроме того, предполагается, что построенная база данных вырубок будет использована в качестве одного из источников информации для обучения полностью автоматического алгоритма детектирования изменений лесного покрова по данным Landsat-8 и Sentinel-2.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (Соглашение ЭБ 075-15-2019-1374, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57718X0294) с использованием созданных в ИКИ РАН технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга и ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Литература

1. Барталев С. А., Стыценок Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
2. Егоров В. А., Барталев С. А., Колбудаев П. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 282–286. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-282-286.
3. Кашницкий А. В., Балашов И. В., Лупян Е. А., Толпин В. А., Уваров И. А. Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156–170.

4. Кашницкий А. В., Лупян Е. А., Балашов И. В., Константинова А. М. Технология создания инструментов обработки и анализа данных больших распределенных спутниковых архивов // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 772–777. DOI: 10.15372/AOO20160908.
5. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
6. Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Барталев С. С., Бурцев М. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Жарко В. О., Кашницкий А. В., Колбудаев П. А., Крамарева Л. С., Мазуров А. А., Оксюкевич А. Ю., Плотников Д. Е., Прошин А. А., Сенько К. С., Уваров И. А., Хвостиков С. А., Ховратович Т. С. Информационная система комплексного дистанционного мониторинга лесов «Вега-Приморье» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 11–28. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-11-28.
7. Ховратович Т. С., Барталев С. А., Кашницкий А. В. (2019a) Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 102–110.
8. Ховратович Т. С., Иванова А. А., Барталев С. А. (2019b) Анализ результатов применения алгоритма детектирования рубок леса по спутниковым данным дистанционного зондирования // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE 2018: сб. ст. конф. ИКИ РАН, 2019. С. 108–115. DOI: 10.21046/rorse2018.108.
9. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Flitman E. V., Loupian E. A., Stytsenko F. V. Assessment of Burned Forest Areas over the Russian Federation from MODIS and Landsat-TM/ETM+ Imagery // Global Forest Monitoring from Earth Observation. CRC Press, 2013. P. 259–286.
10. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853.
11. Potapov P. V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., McCarty J. L., Radeloff V. C., Hansen M. C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 159. P. 28–43.
12. Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aguado I. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types // IEEE Trans. Geoscience And Remote Sensing. 2003. V. 41(5). P. 1056–1061.

The organization of remote sensing data processing for solving the problems of deforestation detection in large areas

A. V. Kashnitskii, T. S. Khovratovich, I. V. Balashov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: kashnizky@gmail.com

The paper describes a specialized satellite data processing unit designed to detect changes in forests associated with deforestation. This data processing unit implements the previously proposed method of detecting forest cutting using satellite data of Landsat and Sentinel-2 systems. It is based on the use of cloud-based software solutions, in which the entire required amount of satellite data is located in storage centers and data processing is performed remotely using distributed shared resources. The proposed processing unit is provided to researchers in the form of a special tool as part of the VEGA-Primorie information system and the VEGA-Science satellite service for collective use. The paper describes how it is used to search, select, analyze and process remote sensing data from large distributed archives. Separately, the principles of combining the results obtained into a single map of deforestation are discussed. Experimental testing of the instrument in a number of regions has shown that the proposed approach allows us not only to avoid the transfer of large amounts of information, but also to significantly simplify the processing of remote sensing data in the task of detecting deforestation. With the help of the developed tool, the opportunities are open for mass detection of deforestation for

a long time and over a large area, as well as quick and independent analysis of data on deforestation sites in any local region in Russia.

Keyword: deforestation, detection of changes, detection of deforestation, remote sensing, information system, forest monitoring, logging detection tool

Accepted: 01.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-103-111

References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-Based Assessment of Russian Forest Fire Mortality), *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
2. Egorov V. A., Bartalev S. A., Kolbudaev P. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Karta rastitel'nogo pokrova Rossii, poluchennaya po dannym sputnikovoi sistemy Proba-V (Land cover map of Russia derived from Proba-V satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 282–286.
3. Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Sozдание instrumentov dlya udalenoj obrabotki sputnikovykh dannykh v sovremennykh informatsionnykh sistemakh (Development of software tools for satellite data remote processing in contemporary information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 156–170.
4. Kashnitskiy A. V., Loupian E. A., Balashov I. V., Konstantinova A. M., Tekhnologiya sozdaniya instrumentov obrabotki i analiza dannykh bol'shikh raspredelennykh sputnikovykh arkhivov (Technology for designing tools for the process and analysis of data from very large scale distributed satellite archives), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 9, pp. 772–777.
5. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentral'nyy kolektivnyy pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
6. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Bartalev S. S., Burtsev M. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Zharko V. O., Kashnitskiy A. V., Kolbudaev P. A., Kramareva L. S., Mazurov A. A., Oksiukevich A. Yu., Plotnikov D. E., Proshin A. A., Senko K. S., Uvarov I. A., Khvostikov S. A., Khovratovich T. S., Informatsionnaya sistema kompleksnogo distantsionnogo monitoringa lesov "Vega-Primor'e" (Vega-Primorie: complex remote forest monitoring information system), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 11–28.
7. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskiy A. V. (2019a), Metod detektirovaniya izmenenii lesov na osnove podpiksel'noi otsenki proektivnogo pokrytiya drevesnogo pologa po raznovremennym sputnikovym izobrazheniyam (Method for detecting forest changes based on subpixel estimation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 102–110.
8. Khovratovich T. S., Ivanova A. A., Bartalev S. A. (2019b), Analiz rezul'tatov primeneniya algoritma detektirovaniya rubok lesa po sputnikovym dannym distantsionnogo zondirovaniya (Evaluation of the algorithm for forest logging detection based on earth observation data), *Informatsionnye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli — RORSE 2018*, Proc. Conf., IKI RAN, 2019, pp. 108–115.
9. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Flitman E. V., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Assessment of Burned Forest Areas over the Russian Federation from MODIS and Landsat-TM/ETM+ Imagery, *Global Forest Monitoring from Earth Observation*, CRC Press, 2013, pp. 259–286.
10. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853.
11. Potapov P. V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., McCarty J. L., Radeloff V. C., Hansen M. C., Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 159, pp. 28–43.
12. Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aguado I., Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, No. 5, pp. 1056–1061.