

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ЛЕСОУСТРОЙСТВА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИНТЕНСИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ВОСПРОИЗВОДСТВА ЛЕСОВ

В статье рассматривается роль дистанционного зондирования (ДЗЗ) в совершенствовании лесоустройства и повышении эффективности государственной инвентаризации лесов (ГИЛ). Основными источниками данных являются спутниковые снимки, данные воздушного лазерного сканирования, методы обработки предполагают использование помимо традиционных стационарных систем облачные платформы (Google Earth Engine) с возможностями машинного обучения. Выделены ключевые проблемы: медленное освоение технологий пользователями, технические сложности верификации и валидации, несоответствие масштабов ДЗЗ и полевых исследований. Проанализированы примеры решений проблем в различных странах (США, скандинавские страны), применение гибридных подходов и веб-сервисов для оперативного доступа к данным.

Ключевые слова: воспроизводство леса; интенсивное использование лесов; дистанционное зондирование Земли; государственная инвентаризация лесов; облачные платформы; машинное обучение.

E. V. Boldanova

USE OF RS DATA IN IMPROVING FOREST MANAGEMENT FOR THE PURPOSES OF INTENSIVE USE AND FOREST REGENERATION

The article discusses the role of remote sensing (RS) in improving forest management and increasing the efficiency of state forest inventory (SFI). The main sources of data are satellite images and airborne laser scanning data. In addition to traditional stationary systems, the processing methods involve the use of cloud platforms (Google Earth Engine) with machine learning capabilities. Key problems are identified: slow adoption of technologies by users, technical difficulties in verification and validation, and inconsistencies between the scales of RS and field studies. Examples of solutions to these problems in various countries (USA, Scandinavian countries) are analyzed, as well as the use of hybrid approaches and web services for rapid access to data.

Keywords: forest reproduction; intensive forest use; remote sensing; state forest inventory; cloud platforms; machine learning.

Интенсивное лесопользование невозможно без использования результатов лесоустройства. Повышение эффективности лесоустройства предполагает интеграцию данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и полевых исследований.

Целью данного исследования является обзор существующих методов ДЗЗ для интенсификации инвентаризации лесов при интенсивном использовании и воспроизводстве лесов.

Результаты ДЗЗ используются достаточно широко в лесном хозяйстве. В современных условиях возможно использование ДЗЗ уже в оперативном режиме. Основными проблемами при этом являются:

- освоение новых технологий пользователями;
- технические проблемы ДЗЗ, связанные с инвентаризацией лесов;
- проблемы с верификацией полученных картографических материалов [1].

Специалисты рекомендуют для решения этих проблем широкое изучение и внедрение опыта сотрудничества науки, практики лесного хозяйства и промышленности, учет потребностей реальных пользователей и использование научных методов проверки качества разрабатываемых карт.

Материалы и методы исследования. В советский период данные ДЗЗ широко использовались для решения некоторых задач в лесном хозяйстве, используя в основном материалы аэрофотосъемки. В зарубежной практике в этот период шла дискуссия: рассматривать ДЗЗ как игрушку или как инструмент [3]. Сегодняшние реалии подчеркивают все большую вовлеченность технологий ДЗЗ в лесном хозяйстве. Это подтверждается:

- разработкой глобальных баз данных о состоянии и динамике лесного покрова Hansen Global Forest Change [2];
- составлением карт для отдельных стран и регионов;
- использованием систем воздушного лазерного сканирования (ВЛС) с помощью LiDAR и цифровой фотограмметрии;
- включение в систему сбора данных датчиков и сенсоров интеллектуальных устройств.

Скорость внедрения технологий ДЗЗ зависит от множества факторов (рис. 1):

- сложившейся системы управления лесами в стране;
- сложности структуры лесонасаждений;
- доступности технологий и баз данных ДЗЗ;
- потребности в результатах обработки ДЗЗ;
- формы собственности на лесные ресурсы;
- наличия тесного сотрудничества науки и промышленности;
- наличия государственной поддержки.

Специалисты, проанализировавшие ход внедрения технологий ДЗЗ, советуют сместить акценты с источников данных и методик обработки на ценность и полезность получаемой информации для пользователей. Конечно, помимо полезности необходимо принимать во внимание размер затрат и технические возможности. Для этого процесса требуется экономический стимул.

Последние годы все чаще наблюдаются экстремальные погодные явления, что требует оперативного обновления информации о состоянии лесов. Возникает потребность сокращения длительности цикла государственной или национальной инвентаризации лесов (ГИЛ и НИЛ).



Рис. 1. Внедрение технологий ДЗЗ в лесном хозяйстве

При этом в европейских странах делается упор на точное лесное хозяйство с учетом каждого дерева, в то время как технологии ДЗЗ позволяют оценивать только древостой в целом. Для российской практики более близким опытом является пример Канады, где значительные площади лесов при низкой плотности пробных лесных площадей. Но в Канаде в каждом регионе свои методики лесоустроительных работ, что приводит к выборочной инвентаризации лесов.

Потребность перехода к оперативному использованию ДЗЗ есть во многих странах, но нет единства по срокам и скорости перехода. Развитие технологий ДЗЗ для НИЛ и ГИЛ происходит длительно и затратно, поэтому выбор стратегий внедрения может быть разным. Это может потребовать совершенно новых рабочих процессов либо может быть модернизация существующих. Либо просто использование ДЗЗ в качестве дополнительного источника данных для инвентаризации лесов.

В Финляндии, Норвегии и Швеции был произведен масштабный и полный переход на использование наиболее информативного источника ДЗЗ — ВЛС. Такое стало возможным благодаря компактности расположения лесонасаждений и государственной поддержки. При внедрении технологий ВЛС в этих странах, а также Канаде и Германии, важную роль сыграли научные исследования, развитие промышленности, структура собственности и уровень использования данных ВЛС.

При внедрении технологий обработки данных ВЛС возникли проблемы технического порядка, связанные с качеством данных (определение порогового значения точности и валидации) и пространственным разрешением.

Цели использования ДЗЗ и технологии отличаются на разных уровнях управления лесами. При использовании ДЗЗ для инвентаризации лесов:

- проводится проверка местоположений участков, наличия леса, подъездных путей;
- оценивается тип леса, плотность лесонасаждений, высота, состояние леса (для контроля или в случае трудной доступности);
- получение дополнительной информации;
- объединение с данными инвентаризации для создания картографических материалов;
- получение локальных оценок из-за недостаточности полевых данных [1].

Существует общая тенденция повышения точности НИЛ и ГИЛ, что приводит к необходимости улучшения интеграции полевых исследований и ДЗЗ. В конечном счете это должно привести не только к повышению точности, но и к снижению затрат на проведение НИЛ и ГИЛ.

Данные ДЗЗ используются для повторных исследований НИЛ и ГИЛ. На данном этапе проблемы возникают с классификацией изображений. При определении типа и возраста леса важное значение имеет узор. Но из-за различий в освещенности усложняется использование созданных шаблонов классификации. Проблема может быть решена за счет использования машинного обучения и использования дополнительных данных.

В настоящий момент основные источники ДЗЗ — снимки Landsat и Sentinel-2, которые образуют своеобразное виртуальное созвездие. Для анализа динамики лесонасаждений применяются подходы, основанные на временных рядах. Эти данные являются бесплатными и условно открытыми, что позволяет проводить анализ динамики сукцессий. При этом могут возникать противоречия между региональными и глобальными базами данных, что требует разработки надежной и прозрачной оценки имеющихся баз данных.

Наблюдаются следующие тенденции при исследовании космоснимков:

- переход от анализа сцен к пиксельному анализу (пиксельный композит);
- разработка алгоритмов обнаружения изменений с использованием открытых данных и растущих вычислительных мощностей (позволяет фиксировать изменения в лесах с пространственным разрешением менее 30 м);
- классификация лесных нарушений (рубок, пожаров, смена древостоя и т.д.) в автоматическом режиме.

Проблемой является также легкость создания новых баз данных без достаточного уровня верификации данных. Например, набор данных Hansen GFC [2], существующий с 2013 г., имеет подтвержденную надежность для бореальных и умеренных лесов, но вызывает вопросы при использовании для полузасушливых и засушливых лесов [8].

Применение открытых наборов данных необходимо учитывать:

- авторитетность источников;
- прозрачность и научность используемых методов;
- точность данных и применяемых технологий [1].

Так, в частности, доступность Google Earth Engine (GEE) еще не делает его точным, нужно хорошо понимать создаваемые обучающие выборки и применяемые методы, владеть надежными способами оценки точности.

Существует методическая проблема соответствия качества создаваемых продуктов (например, ряды динамики о состоянии лесонасаждений) требованиям пользователей [7]. Обычно используются показатели точности, основанные на матрице ошибок. Оценка точности проводится либо на основе карты, когда картографический материал выступает в качестве вспомогательной информации, и точность определяется как стандартная ошибка или доверительный интервал. Либо карта выступает в качестве основного источника данных, а полевые исследования используются для калибровки модели. Может использоваться и комбинация перечисленных методов. Например, использование данных ВЛС в качестве промежуточного набора данных между полевыми наблюдениями и данными космоснимков. Либо сочетание наземного лазерного сканирования с БПЛА и спутникового (система GEDI) с использованием иерархического вывода.

При внедрении ДЗЗ в оперативное управление лесами и мониторинг возникают ряд проблем. Одна из них — медленное освоение пользователями технологий ДЗЗ. В некоторых странах проблема была решена путем организации взаимодействия между наукой, лесным хозяйством и государством. Для этого оказалось необходимым:

- понимать потребности пользователей информации;
- оценивать возможности и ограничения ДЗЗ;
- передавать технологии, методы и опыт использования в оперативную практику;
- анализировать используемые рабочие процессы и местные условия;
- создавать финансовые стимулы для перехода к новым технологиям;
- предоставлять инфраструктуру данных;
- обеспечивать обмен историями успеха [1].

Другой проблемой оказался учет и сопоставимость масштабов ДЗЗ и локальных исследований, учет диапазона условий, в которых проводились наблюдения (данные по всему участку применялись к отдельному насаждению).

Следующая проблема — широкая распространенность карт на основе ДЗЗ при недостаточной оценке их качества и точности, что приводит к их дискредитации. Необходимо понимать применение различных статистических инструментов.

И последней проблемой можно отметить, что в дальнейшем возможности использования ДЗЗ будут расширяться для новых задач оценки состояния лесов.

Результаты исследования и обсуждение. Рациональное управление лесами требует надежные данные о состоянии и динамике лесных ресурсов. Необходимы эффективные системы мониторинга для научно обоснованных принятых решений. Эти системы мониторинга лесных ресурсов составляют основу национальных и государственной инвентаризации лесов (НИЛ и ГИЛ).

Эффективность НИЛ (ГИЛ) может быть повышена за счет включения ДЗЗ как источника дополнительной информации в наземные лесные инвентаризации. Но вариантов интеграции ДЗЗ в НИЛ много, поэтому требуется разработка представления взаимодействия НИЛ и ДЗЗ. Опыт США по использованию ДЗЗ в НИЛ достаточно длительный и может быть рассмотрен в качестве примера

решения основных проблем, возникающих при интеграции ДЗЗ и НИЛ. Обзор такого опыта применения ДЗЗ изложен у Э. Дж. Листер и др. [5].

Общепринятое мнение, что НИЛ является важным источником информации для принятия решений по управлению лесами, планированию и разработке стратегий устойчивого лесопользования. Развитие систем мониторинга требует значительных вложений, и они должны быть экономически эффективными.

НИЛ строится на основе статистической выборочной системы с использованием пробных площадок (ПП), выбранных для лучшего представления данных (для этого создаются панельные данные).

Оценка эффективности НИЛ проводится с использованием статистических терминов: доверительный интервал (чем уже значение доверительного интервала, тем точнее данные), дисперсия, стандартная ошибка. Оценка точности НИЛ проходит с помощью стандартных статистических показателей. Для принятия решений определены пороговые значения показателей точности. Основные факторы, которые влияют на точность НИЛ: план расположения ПП, размер выборки, статистическое оценивание и способ вывода результата. Существует два основных способа вывода: на основе данных полевых исследований и вывод на основе модели, а также гибридные методы.

При использовании вывода на основе данных полевых исследований точность будет зависеть от того, насколько случайна выборка ПП. Оценка определяется на основе среднего арифметического, дисперсии и размера доверительного интервала (рассчитанного с помощью дисперсии ошибок и t-критерия Стьюдента), т.е. на основе теории выборки исследования. Отчет о неопределенности позволяет принимать более взвешенные решения. Для повышения точности используют дополнительную информацию. Есть разные подходы для получения и использования дополнительной информации:

- увеличить размер выборки (но это связано с дополнительными затратами);
- пересмотреть конфигурацию участка (увеличить площадь участка или использовать кластер из нескольких мелких участков, в сумме равный площади первоначального участка);
- использовать вспомогательную информацию в виде страт, связанных с интересующим показателем.

Но использование этих способов может быть ограничено стремлением отслеживать динамику изменений лесонасаждений на выбранном ранее участке.

После стратификации на основе полевых данных и аэрофотосъемки (сегодня все более распространено использование космоснимков) может проводиться моделирование. В США при проведении НИЛ используют постстратификационную оценку в качестве стандартного инструмента. Недостатком является более грубый уровень, на котором бывает получена вспомогательная информация. Оценки с использованием моделей позволяют использовать вспомогательную информацию на уровне участка более подробно, чем страты. В качестве моделей используют и статистическое обучение, и машинное. Хорошо себя зарекомендовал подход машинного обучения на основе

случайного леса (Random Forest). Кроме того, доказано, что использование ДЗЗ повышает точность модели [6].

Второй способ вывода предполагает использование моделирования. Этот способ позволяет получить покрытие всей территории, а не только ПП. Обоснованность значений строится не на вероятностных выборках, а на модельной взаимосвязи между интересующим показателем и вспомогательной информацией. Такой подход возможен для труднодоступных районов либо мест с низкой плотностью ПП. Недостаток данного вывода связан с сильной зависимостью от выбранной модели. Поэтому необходимо использовать статистические оценки качества модели.

Существуют так же гибридные выводы, представляющие собой сочетание черт вывода на основе полевых данных и модели. Для этого используют вероятностные выборки и модельные данные в виде прогнозов с существенной неопределенностью.

Для повышения экономической эффективности возможно использовать различные способы. Первый способ заключается в соблюдении требований точности НИЛ с меньшим количеством ПП за счет использования ДЗЗ. Экономия средств может быть направлена на создание картографических приложений, позволяющих повысить оперативность принимаемых решений. Второй способ предполагает интеграцию данных ДЗЗ, что позволит избежать ненужных полевых работ, например, на нелесных территориях (экономия на полевых исследованиях). ДЗЗ можно использовать для измерения характеристик, которые поддаются удаленному наблюдению (определение типа землепользования или почвенного покрова). Но интеграция ДЗЗ также влечет расходы. Особенно затратно приобретение космоснимков (до 2008 г. снимки Landsat были платными, в настоящее время в РФ тоже используются платные космоснимки).

Использование снимков MODIS, Landsat, Sentinel-2, а также приложений LandTrendr и TimeSync позволили существенно облегчить процесс получения и обработки снимков.

Наиболее существенный прорыв в технологиях ДЗЗ произошел в последние несколько десятилетий. Одним из таких примеров является использование облачных вычислений в Google Earth Engine (GEE). В GEE реализована распределенная обработка данных из нескольких архивов, что позволяет существенно повысить производительность в обработке и анализе изображений. Особенно заметен прогресс при составлении карт для значительных территорий. Примером такого использования GEE является набор данных Global Forest Change (GFC) Hansen M.C. et al. (2013) [2]. GFC — это ежегодно обновляемые карты изменения лесного покрова на основе снимков Landsat, начиная с 2000 г. по настоящее время. Анализ проводится на основе машинного обучения.

Рабочий процесс обработки ДЗЗ и получения результата до эпохи облачных вычислений представлен на рис. 2.

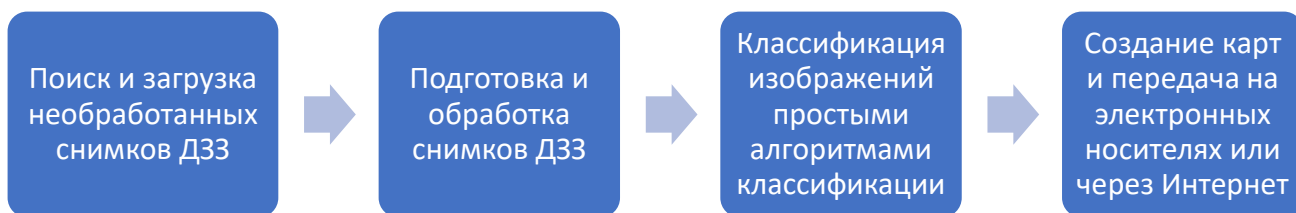


Рис. 2. Рабочий процесс обработки ДЗЗ и получения результата до эпохи облачных вычислений

Рабочий процесс в эпоху облачных вычислений представлен на рис. 3.

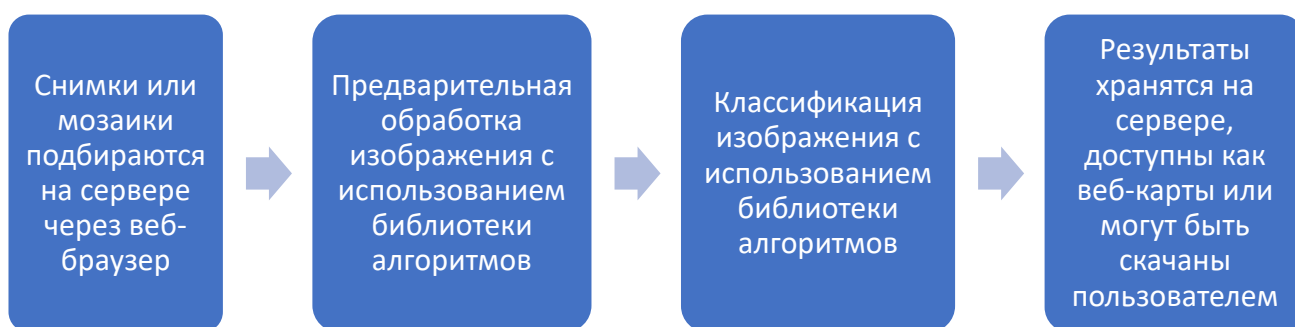


Рис. 3. Рабочий процесс обработки ДЗЗ и получения результата до эпохи облачных вычислений

Инструменты LandTrendr и другие получают развитие в GEE, появляются инструменты для анализа динамики растительности LandTrendr в GEE и Continuous Change Detections and Classification (CCDC). Кроме прочего, здесь проводится маскирование облаков, теней и снега на основе машинного обучения [5]. В США реализован непрерывный мониторинг, оценка и прогнозирование изменений земель.

Следующая технология позволяет подключаться в настольных ГИС к облачным данным, что позволило еще повысить эффективность работы. Начался тренд на предоставление доступа к массивным базам данных через веб-сервисы. В ПО ГИС добавили инструменты веб-картографических сервисов WMS, WFS, WCS [4]. Это позволяет пользователям взаимодействовать с уже имеющимися растровыми и векторными данными, хранящимися на серверах поставщиков информации. Такой подход значительно упрощает доступ к данным. Вместо загрузки картографических материалов, охватывающих значительные территории и имеющих существенный объем, пользователь получает доступ к интересующему его участку через веб-сервис. В данном случае не требуется большой объем для хранения данных, нужен просто доступ в Интернет. Подключение через WMS с получением доступа к ДЗЗ может также использоваться для подготовки к полевым работам.

Еще одно направление повышения эффективности использования ДЗЗ — это автоматизированная классификация спутниковых изображений на основе

пиксельной классификации с машинным обучением. Этот инструмент лучше всего реализован в GEE.

Объектно-ориентированный анализ изображений на основе уже имеющихся классифицированных данных позволит достаточно точно и эффективно проводить классификацию изображений территорий, которые недостаточно были охвачены инвентаризацией либо эти работы проводились давно.

Дальнейшее развитие использования ДЗЗ связано с созданием трехмерных моделей на основе фотограмметрии и ВЛС.

Длительный опыт использования ДЗЗ в практике НИЛ в США позволяет экспертам сделать некоторые замечания [5]:

1) данные НИЛ бесценны для создания продуктов ДЗЗ. Они предоставляют стандартизованный источник данных для обучения моделей, и их использование повышает точность моделей ДЗЗ. Данные НИЛ могут использоваться для верификации создаваемых моделей на основе ДЗЗ;

2) для успешного использования данных ДЗЗ необходим доступ к источникам ДЗЗ, ПО и оборудованию. Опыт показал, что повышение доступности данных Landsat, облачных вычислений привело к разработке новых технологий обработки данных;

3) достижения в использовании ДЗЗ являются стимулом для новых научных исследований;

4) развитие использования ДЗЗ идет постепенно, начиная с открытия и заканчивая применением на практике. И в этом развитии есть моменты, когда внедрение технологий может потерпеть неудачу, как это было с первыми попытками прикладного исследования, после разработки прототипа или после начала прикладного использования [5] (рис. 4):

а) неудача после попытки прикладного исследования выражается в невозможности осуществить исследование или несоответствии ожидаемым результатам из-за плохо продуманных исследовательских идей в попытке интегрировать элементы многих исследований и удовлетворить все потребности заинтересованных сторон;

б) неудача после разработки прототипа может быть связана с большими затратами на практическое внедрение или недостаточная зрелость разработки;

в) неудача после прикладного использования может быть связана с неготовностью пользователей применять результаты новой технологии. Решением данной проблемы является популяризация новых технологий и обучение широкого круга пользователей.

Творческий прорыв и повышение эффективности в применении ДЗЗ стали возможны благодаря конкуренции идей и сотрудничеству между всеми участниками. Это является основой для будущих исследований.

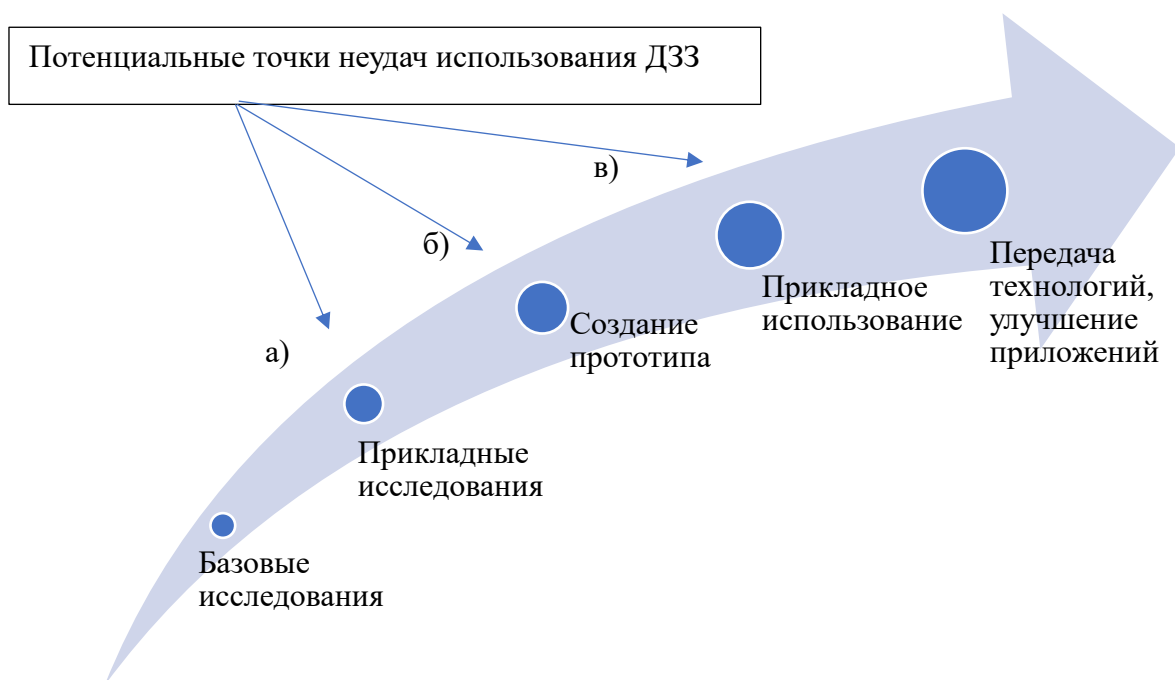


Рис. 4. Развитие использования ДЗЗ с указанием моментов неудач

В заключение можно предположить, что дальнейшее развитие технологий ДЗЗ будет идти по следующим направлениям:

1) использование временных рядов ДЗЗ. Опыт использования снимков Landsat позволяет осознать необходимость и применимость анализа динамики изменений на основе космоснимков. Дальнейшее развитие будет связано с использованием снимков из других баз ДЗЗ, например, Sentinel-2. Также важным является опыт создания выборок для проведения машинного обучения вместо обработки целиком сцен космоснимков. Использование выборок в данных временных рядов (от размера пиксела до некоторых районов) позволит существенно оптимизировать использование объемов дополнительных ресурсов для хранения, обработки и создания картографических материалов, проводя при этом исправление визуальных разрывов, исключение облаков и теней. Оказывается, проще использовать ручные методы выборки для оценки изменений лесного покрова при автоматизации подготовки исходных данных;

2) облачные вычисления и хранение: объединение различных площадок облачных вычислений (GEE, Amazon Web Services, Esri ArcGIS Enterprise Image Services, приложения ArcGIS) с инструментами анализа динамики изменений (LandTrendr, CCDC) предоставит возможность ежегодно проводить оценку изменений и использование в национальных программах мониторинга. Эксплуатация z-координаты (высоты) позволит добавлять данные цифровой модели рельефа (ЦМР) к космоснимкам для повышения точности классификации.

Интеграция данных дистанционного зондирования с данными полевых исследований в системе лесоустройства обеспечит полный охват территорий лесного фонда для повышения точности таксационных оценок и эффективности воспроизводства лесов в условиях интенсивного лесопользования.

Список использованной литературы

1. Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions / F. E. Fassnacht et al. // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. — 2024. — Т. 97, № 1. — С. 11–37.
2. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change / M. C. Hansen et al. // *science*. — 2013. — Т. 342, № 6160. — С. 850–853.
3. Hildebrandt G. TOY or TOOL — Fernerkundung aus dem Weltraum: spiel- oder Werkzeug für die Forstwirtschaft? // *Forstwissenschaftliches Centralblatt*. — 1987. — Т. 106, № 1. — С. 141–168.
4. Geospatial Web Services: Bridging the Gap Between OGC and Web Services / E. Ioup et al. — 2008.
5. Use of remote sensing data to improve the efficiency of national forest inventories: a case study from the United States national forest inventory / A. J. Lister et al. // *Forests*. — 2020. — Т. 11, № 12. — С. 1364.
6. Magnussen S. A second look at endogenous poststratification / S. Magnussen, H. E. Andersen, P. Mundhenk // *Forest Science*. — 2015. — Т. 61, № 4. — С. 624–634.
7. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change / P. Olofsson et al. // *Remote sensing of Environment*. — 2014. — Т. 148. — С. 42–57.
8. Shafeian E. Mapping fractional woody cover in an extensive semi-arid woodland area at different spatial grains with Sentinel-2 and very high-resolution data / E. Shafeian, F. E. Fassnacht, H. Latifi // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. — 2021. — Т. 105. — С. 102621.
9. Forest 4.0: Digitalization of forest using the Internet of Things (IoT) / R. Singh et al. // *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. — 2022. — Т. 34, № 8. — С. 5587–5601.

Информация об авторе

Болданова Елена Владимировна — кандидат экономических наук, доцент кафедры отраслевой экономики и управления природными ресурсами, Байкальский государственный университет, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, BoldanovaEV@bgu.ru.

Author

Boldanova Elena Vladimirovna — Ph. D. in Economics, Associate Professor of the Department of Sectoral Economy and Natural Resources Management, Baikal State University, 11 Lenin Str., Irkutsk, 664003, BoldanovaEV@bgu.ru.