

УДК 528.94:004+ 632.92(571.1/.5)  
DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-4-44-54

## ВОЗМОЖНОСТИ ГИС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УССУРИЙСКОГО ПОЛИГРАФА В ПИХТОВЫХ ЛЕСАХ СИБИРИ

**Иван Андреевич Керчев**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем, тел. (3822)49-18-55, e-mail: ivankerchev@gmail.com

**Елена Сергеевна Волкова**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории самоорганизации геосистем, тел. (3822)49-22-23, e-mail: elevolko@yandex.ru

**Мария Алексеевна Мельник**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории самоорганизации геосистем, тел. (3822)49-22-23, e-mail: melnik-m-a@yandex.ru

В последние десятилетия серьезный урон пихтовым лесам Сибири нанесен инвазионным короедом дальневосточного происхождения – уссурийским полиграфом *Polygraphus proximus* Blandf. Ущерб от воздействия вредителя выражается в денежном эквиваленте и в утрате многих экологических функций лесных экосистем. Технологии организации наземного мониторинга за распространением вредителя успешно апробируются сибирскими учеными, позволяют с привлечением ГИС-технологий дать пространственно-временной анализ масштабов происходящих негативных процессов. Цель данной статьи – показать возможности ГИС-технологий в сочетании с дистанционным зондированием в изучении процессов инвазии уссурийского полиграфа на примере лесных территорий Томской области. Показано, что геоинформационный подход к исследованию состояния пихтовых лесов в очагах массового размножения вредителя позволяет создать серию тематических карт, отражающих крупномасштабные пространственно-временные изменения насаждений, и дать краткосрочный прогноз развития очагов. Высокая эффективность данного подхода показана при локальном анализе развития очага и для оценки динамики массового размножения вредителя на уровне лесничеств. На основе встроенной аналитической информации и картографического отображения становится возможным прогноз возникновения новых очагов, мониторинг и контроль их развития.

**Ключевые слова:** уссурийский полиграф, пихтовые леса Сибири, ГИС-технологии, картографирование, очаг размножения, мониторинг лесов, ДЗЗ, вредители лесов, прогноз

### **Введение**

Вспышки массового размножения насекомых-вредителей наносят непоправимый вред лесному хозяйству во многих регионах мира. Так, например, в США насекомые-дендрофаги причиняют ущерб, исчисляемый в 5 млрд долларов в год [1]. В Англии ежегодные потери лесной продукции от вредителей оцениваются в размере около 2 млн долларов США [2]. В планетарном масштабе за период с 2003 по 2012 г. от насекомых-дендрофагов пострадали насаждения

на площади более 85 млн га, причем значительная часть повреждений приходилась на бореальные леса [3, 4].

В лесах Западной Сибири периодические крупные вспышки массового размножения насекомых-вредителей происходят довольно часто и носят характер эпифитотий. Для этого региона наиболее известным и опасным вредителем является сибирский шелкопряд (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.), очаги которого ежегодно охватывают площадь от 4,2 тыс. га до 6,9 млн га [5]. В последнее десятилетие по наносимому ущербу лесополь-

зованию в один ряд с сибирским шелкопрядом можно поставить инвазионного вредителя дальневосточного происхождения – уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf., который уже вызвал широкомащтабное усыхание пихтарников в семи регионах Сибирского федерального округа Российской Федерации: Томской, Кемеровской, Новосибирской областях, Алтайском и Красноярском краях, республиках Алтай и Хакасия [6]. Локальные очаги чужеродного короеда были также зафиксированы в Республике Удмуртия и Иркутской области [7, 8]. Ежегодно в темнохвойных лесах Сибири от этого вредителя гибнут большие площади пихтовых насаждений, по некоторым данным средняя скорость отмирания деревьев пихты в очагах короеда составляет около 7 % в год [9].

В рамках изучения процессов инвазии уссурийского полиграфа выявление степени деградации пихтарников, оценка возможных рисков, ущербов и последствий для сферы лесопользования [10], а также прогноз дальнейшего распространения вредителя [8, 9, 11] реализуются с помощью организации системы комплексного мониторинга [6, 11]. Пространственно-временной анализ масштабов происходящих негативных процессов, связанных с воздействиями вредителей леса, наиболее результативно осуществляется с привлечением современных географических методов – ГИС-технологий [12, 13].

Преимущество их использования состоит в конструктивных возможностях хранения, обработки и отображения большого объема информации, включающей в себя цифровые и картографические характеристики, полученные в ходе сбора данных наземного и дистанционного наблюдений, как по усыханию пихтовых насаждений, так и по активности самого вредителя. Сформированная база данных, встроенный аппарат пространственного моделирования и создаваемые на их основе картографические продукты способствуют оперативному принятию управленческих решений по сокращению рисков лесопользования в местности, где уссурийский полиграф распространяется наиболее стремительными темпами.

### **Объект, материалы и методы исследований**

Пихтовые леса занимают обширные пространства Западной Сибири, выполняя многочисленные экосистемные и эколого-экономические функции. Воздействие уссурийского полиграфа на пихтовые насаждения не только приводит к значительным материальным потерям для многих отраслей лесопользования, но и вызывает трансформации специфических средообразующих условий в таежных экосистемах – изменение гидрологического и светового режима, что в свою очередь влечет разнообразные негативные экологические эффекты, такие, например, как сокращение естественного биологического разнообразия и снижение продуктивности лесов [14].

Технология мониторинга состояния пихтовых насаждений в теоретическом плане детально разработана учеными ИМКЭС СО РАН и практически апробирована на территории Томской области – одном из наиболее изученных регионов инвазии уссурийского полиграфа. Сеть наземного мониторинга включает 46 постоянных пробных площадей в особо охраняемых территориях в десяти из 16 районов области, где систематически проводится оценка текущего состояния и степени трансформации основных компонентов пихтовых экосистем [11]. При этом в эксплуатационных пихтовых лесах для установления границ инвазии ежегодно осуществляются обследования на временных пробных площадях.

В связи с труднодоступностью большей части территории Сибири, наземный метод мониторинга не всегда приемлем, а, следовательно, остается много «белых пятен» на карте поврежденных пихтовых насаждений. Использование качественных и детальных космических снимков и возможность авиационного надзора в большинстве случаев сложно реализуемые способы мониторинга. Альтернативным решением проблемы в этом случае служит метод дистанционного зондирования, предполагающий использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Данный подход при более низких финансовых вложениях позволяет получить детализированную и актуальную информацию по со-

стоянию пихтового древостоя в границах, соответствующих техническим особенностям БПЛА. Юридический статус осуществления лесопатологических обследований дистанционным методом с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) определен в Приказе Минприроды России № 480 от 16.09.2016 [15]. Для дистанционного мониторинга состояния пихтовых насаждений на исследуемых пробных площадях Томской области был задействован БПЛА Supercam S350f (ООО «Беспилотные технологии», г. Ижевск), оснащенный цифровой камерой SONY A6000 (24 Мпикс; фокусное расстояние объектива  $f = 20$  мм; тип сенсора: КМОП; размер матрицы:  $23,5 \times 15,6$  мм; разрешение  $6\,000 \times 4\,000$  пкс). Съемки районов изучения инвазии уссурийского полиграфа осуществлялись с высоты 500 м и включали радиус охвата 250 м.

Привязка снимков с БПЛА к системе глобального позиционирования (GPS) позволила их встроить и обработать в среде ГИС. В качестве прикладного программного обеспечения был выбран программный пакет ArcGis 10.3. Пространственно-временная оценка последствий воздействия уссурийского полиграфа на аборигенные пихтовые насаждения выполнена в рамках созданного в среде ArcGis тематического ГИС-проекта «Исследование процессов распространения уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximi* Blandf) в пихтовых лесах Томской области».

Оценка категорий состояния пихты при повреждении уссурийским полиграфом проведена по ранее описанной методике анализа ортофотоснимков [11] для 47 990 деревьев. Локальная оценка насаждения по степени риска дальнейшего заселения вредителя на неповрежденные пихты была проведена с использованием инструмента Интерполяции на основе метода обратно взвешенных расстояний (ОВР). Согласно этому методу, влияние на картируемую переменную, т. е. на здоровые пихтовые деревья, уменьшается по мере удаления от местоположения усохших деревьев и от воздействия вредителя. Использование метода ОВР достигает лучших результатов в том случае, если сеть опорных точек достаточно плотная, что хорошо прослежива-

ется в нашем случае, поскольку в насаждении доля пихты составляет 56,2 %. Величина параметра Power, позволяющего контролировать влияние известных точек на интерполируемые значения, было выбрано равное трем.

Банк геоданных – информационная основа ГИС-проекта – формировался, исходя из поставленных задач, и объединил обширный картографический архив, каталог тематических баз данных, цифровую модель рельефа и материалы полихронной аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения.

Картографический архив проекта представлен совокупностью векторных карт (слоев в формате shp), – формализованных в цифровом виде реальных объектов картографирования и объединенных на основании общих свойств или функциональных качеств. В состав архива вошли: топографическая основа, лесохозяйственное районирование, административно-территориальное деление, местоположение метеостанций и пробных площадок, дорожно-транспортная сеть и т. д. Все цифровые слои приведены к единой системе координат WGS 84 и трансформированы в проекцию UTM.

Фактологические данные проекта представлены в виде файлов формата dBase как совокупность отдельных тематических баз данных и атрибутивных таблиц цифровых слоев, включающих основные таксационные характеристики насаждений (тип леса, породный и возрастной состав, запас, средний и текущий прирост, класс бонитета и др.), долю усыхания насаждений, средневзвешенную категорию состояния деревьев, среднюю скорость отмирания деревьев пихты в очагах уссурийского полиграфа. Дополнительно в базу данных включены комплексные метеопоказатели для анализа природно-климатических условий, способствующих распространению вредителя [16]. Информация об объектах мониторинга хранится в базе данных в границах существующего административного и лесохозяйственного деления (область, район, лесничество, участковое лесничество, квартал, выдел). За первичные учетные единицы принимаются таксационные выделы, для которых представлена наиболее детальная информация по всем вышеперечисленным показателям.

Для наполнения и систематического обновления баз данных использовались ежегодные отчеты Департамента лесного хозяйства Томской области, Филиала ФБУ «Российский центр защиты леса», материалы лесохозяйственного регламента, результаты полевых исследований Лаборатории мониторинга лесных экосистем ИМКЭС СО РАН, данные Гидрометцентра РФ, Федеральной службы государственной статистики.

### Результаты и обсуждение

Выделяются несколько категорий базовых задач по исследованию процессов распространения уссурийского полиграфа в пихтовых лесах Сибири, решению которых в большей степени способствуют ГИС. С целью исследования состояния лесной растительности [17, 18], в том числе и при изучении распространения вредителей [19, 20], в настоящее время широко применяются методы оценки данных космической и аэрофотосъемки. Опыт использования локального геоинформационного анализа показывает его эффективность при решении задач комплексной детальной характеристики очагов

вредителя. Иллюстрацией может служить обследование состояния пихтарников на модельных пробных площадках с помощью аэрофотосъемки. Полученные ортофотоснимки в RGB спектре визуально интерпретировались по внешним признакам кроны для установления формирующегося очага уссурийского полиграфа. На рис. 1 представлены результаты пространственного моделирования для пробной площадки в Прикульском участковом лесничестве Корниловского лесничества близ с. Итатка Томской области.

Результаты интерполяции достаточно точно отражают не только текущую степень повреждения пихтового древостоя, но и годовой прогноз заселения вредителя, что было подтверждено натурными наблюдениями следующего сезона (рис. 1, а). Сравнительный анализ наземных исследований и материалов дешифрирования также показали вполне корректные совпадения: по данным, полученным с помощью аэрофотосъемки, общий отпад пихты по числу деревьев в древостое составил 93,7 %; по сравнению с данными наземного обследования этот показатель равен 93,1 % – разница с дистанционной оценкой не превысила 1 %.

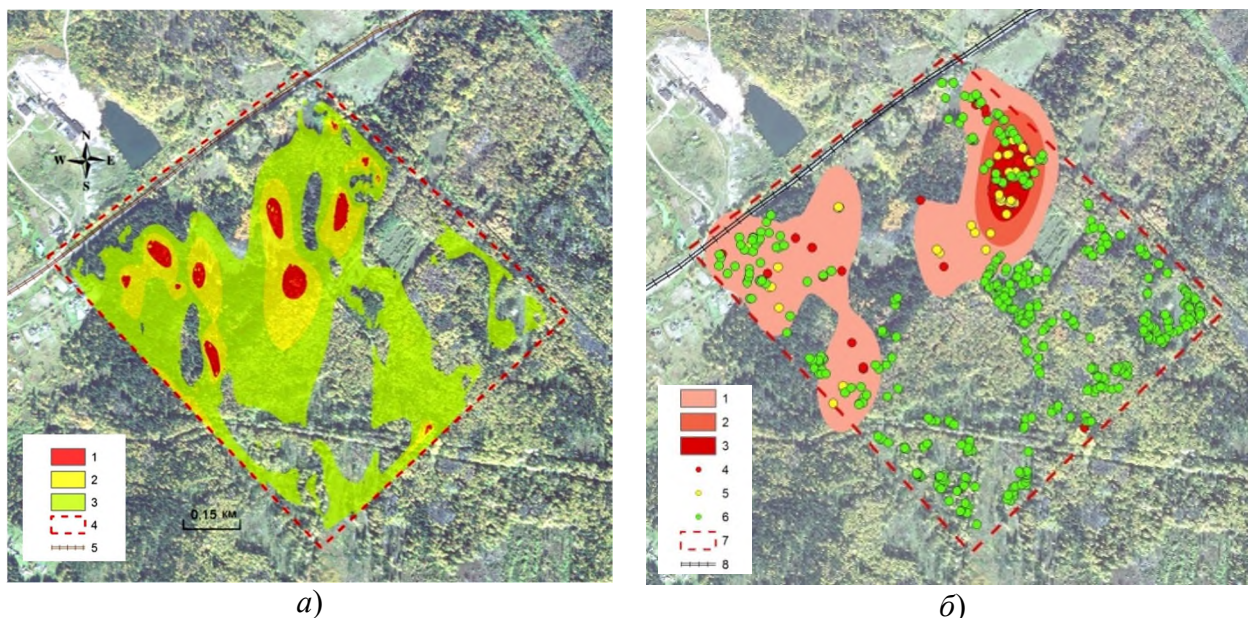


Рис. 1. Поврежденность пихтового леса в очагах размножения уссурийского полиграфа на пробной площадке (ПП) в Прикульском участковом лесничестве на 12.08.2017:

- а) степень поврежденности пихтовых насаждений: 1 – сильно поврежденные, 2 – незначительное повреждение, 3 – не поврежденные; 4 – границы района исследования; 5 – железная дорога;
- б) зонирование плотности повреждений пихты в древостое от воздействия уссурийского полиграфа: значение плотности: 1 – высокая, 2 – средняя, 3 – сильная; состояние пихты: 4 – погибшее дерево, 5 – ослабленное дерево, 6 – здоровое дерево; 7 – границы района исследования; 8 – железная дорога

Дальнейшее внедрение в процесс анализа ортофотоснимков алгоритмов машинного зрения позволяеткратно увеличить скорость обработки данных и получения количественных и качественных характеристик состояния древостоя. Первые результаты, полученные уже на данный момент в этом направлении, показывают высокий потенциал для дальнейшего развития и внедрения технологии в практику [21], которая также может быть интегрирована с описываемым ГИС-проектом.

Отображение густоты поврежденных короедом деревьев было проведено с использованием метода плотности ядер (рис. 1, б). Используя функцию ядра для пригонки плавно

сужающейся поверхности к каждой точке, метод плотности ядер рассчитывает количество точечных объектов, в нашем случае заселенных деревьев, на единицу площади. Данный инструмент позволяет оценить лесопатологическое состояние насаждения и прогнозировать зарождение крупного очага вредителя.

Еще одной задачей, успешно решаемой с помощью ГИС, как на локальном, так и на региональном уровнях является процедура оценки ущерба от воздействия вредителей. На рис. 2 и 3 представлено картографическое отображение оценки прямого ущерба при обследовании постоянных пробных площадок.

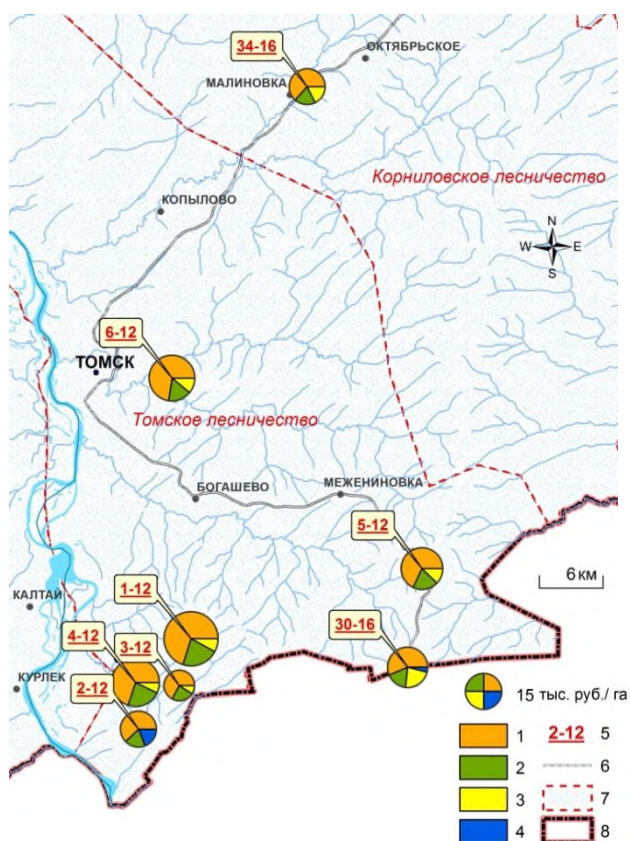


Рис. 2. Оценка прямого ущерба от воздействия уссурийского полиграфа для модельных участков Томского района Томской области:

Величина ущерба от потери: 1 – древесины; 2 – пихтовой лапы; 3 – живицы; 4 – новогодних пихт; 5 – номера пробных площадок; 6 – железная дорога; 7 – границы участкового лесничества; 8 – граница области

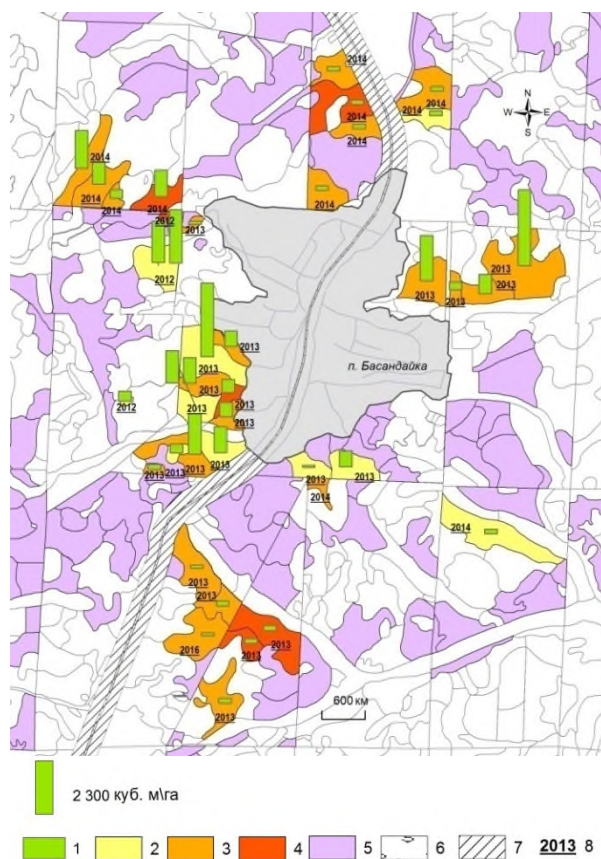


Рис. 3. Санитарно-оздоровительные мероприятия, проведенные в очагах размножения уссурийского полиграфа – в Межениновском участковом лесничестве в 2012–2016 гг.:

1 – объем санитарных рубок; средневзвешенная категория состояния древостоя пихты; 2 – ослабленные и сильно ослабленные насаждения; 3 – отмирающие насаждения; 4 – погибшие насаждения; 5 – насаждения с преобладанием пихты; 6 – границы выделов; 7 – полоса отвода железной дороги; 8 – год обследования

Данные для расчетов получены в результате полевых наблюдений за состоянием древостоев пихты сибирской на ППП, заложенных в лесах Томского лесничества Томской области. В атрибутивную таблицу «Постоянные пробные площадки» занесены следующие значения показателей: доля пихты, класс бонитета, запас древесины, средний диаметр, средняя высота, средний возраст, доля усохших деревьев, разряд такс.

Основные расчеты были сделаны как по отдельным видам ущербов, так и по суммарному ущербу в стоимостном выражении на основе авторских методик [10]. Применение опций графического отображения позволяет наглядно представлять на карте эти виды, причем в разных масштабах. Так, например, на рис. 2 показаны структура и значения прямого ущерба на единицу площади посредством круговых диаграмм. Они демонстрируют, что самые высокие значения фактического прямого ущерба от вредителя – от 17 до 24 тыс. руб./га – наблюдаются в спелых насаждениях, где повреждено более 70 % пихты и усыхание носит массовый характер.

Более крупномасштабная визуализация экспансии уссурийского полиграфа и прилагаемых мер по сдерживанию ее темпов показана на рис. 3. Высказывались вполне обоснованные предположения, что он был завезен в Сибирь по железной дороге с Дальнего Востока [22, 23], поэтому наличие железнодорожных путей, а также мест погрузки или складирования древесины выступает опасным рискоформирующим фактором. В районе Межениновского участкового лесничества, по территории которого проходит крупная железнодорожная ветка, пихтарники занимают обширную площадь, и очаги полиграфа впервые здесь были зафиксированы Центром Защиты леса в 2012 г. Постепенно вредитель распространялся по территории, в некоторых местах полностью уничтожая пихтовые насаждения, и довольно значительные площади пихтовых насаждений за последние пять лет были отведены в санитарную рубку. Подобную картину можно увидеть на рис. 3, где вдоль железной дороги Томск – Итатка зафиксированы очаги усыхания пихты, вызванные уссурийским полиграфом. Картографиче-

ский фрейм усыхания пихтарников Межениновского участкового лесничества включает тематические слои границ участковых лесничеств, кварталов и выделов, населенных пунктов и транспортной сети. Атрибутивная таблица выделов дополнена информацией о периодах обследования лесных насаждений по породному составу, ликвидному запасу и категории защитности. Средневзвешенный коэффициент состояния древостоев, отражающий интегральное значение их текущего состояния, рассчитывался по стандартной методике с помощью опции вычисления значений атрибутов.

Пространственный анализ при изучении инвазии лесных вредителей предполагает использование важного географического метода – районирования, т. е. выделение территориальных неоднородностей исследуемого процесса. Можно выделить несколько основных признаков, лежащих в основе такого районирования для уссурийского полиграфа: по уровню вредоносности, по основным факторам опасности возможного распространения вредителя, лесопатологическое и лесозащитное районирование. Так, например, анализ факторов, способствующих экспансии уссурийского полиграфа (факторов опасности), проводился на уровне области с использованием масштаба 1 : 5 000 000. При выделении районов в качестве критериев опасности брались во внимание восемь основных факторов, способствующих расселению вредителя. В атрибутивную таблицу тематического слоя «Метеоданные» были занесены значения этих факторов по местоположению метеостанций (точечный класс пространственных объектов). Интерполяция по полю комплексного значения факторов опасности показала, что наибольшая степень опасности от экспансии уссурийского полиграфа в пихтовых лесах наблюдается в южных и юго-восточных частях Томской области. Основная же волна возможного распространения вредителя была направлена с юго-запада и юго-востока на северо-запад [16], что подтвердилось последующими исследованиями [11].

Таким образом, одно из важных свойств ГИС заключается в возможности как детализации, так и обобщения (генерализации) информации, что позволяет рассматривать явле-

ния и процессы в динамике и связывать разномасштабные данные между собой. При этом пошаговая детализация позволяет выделить необходимые подробности при укрупнении масштаба. Генерализация обеспечивает обобщение информации при уменьшении масштаба [24]. Кроме того, особенности и структура сформированной базы данных в рамках созданного ГИС-проекта помогают добавлять и изменять количественные показатели в оперативном режиме с минимальными затратами. Выборка и сопоставление данных из разных атрибутивных таблиц позволяют проводить комплексный анализ, что, в свою очередь, дает возможность совмещать разнородные показатели и строить интегральные тематические карты.

### Заключение

Изучение зарубежного опыта исследования подобных бедствий приводит к заключению, что инвазии и экспансии вредителей не имеют административных границ, а наибольшей эффективностью обладают меры, направленные на предупреждение проникновения чужеродных видов [25, 26]. Для минимизации ущерба от гибели пихтарников необходимо изначально планировать и финансировать профилактические мероприятия на региональном уровне, но при этом учитывать локальные исходные условия и особенности путей распространения уссурийского полиграфа.

*Авторы выражают благодарность А. В. Скворцову и Д. С. Сарычеву (ООО «ИНДОРСОФТ») за проведение дистанционного зондирования с использованием БПЛА и предоставление исходных снимков. Работа выполнена в рамках НИОКТР (№ 121031300226-5).*

Комплексный анализ процесса инвазии на разных территориальных уровнях иерархии на основе единого информационного массива достаточно оперативно и достоверно можно сделать средствами ГИС. Геоинформационный подход к исследованию состояния пихтовых лесов в очагах массового размножения на локальном уровне в границах участковых лесничеств, кварталов, выделов и пробных площадей позволяет учитывать лесорастительные условия и характеристики насаждения, а также получать серию тематических карт, отражающих крупномасштабные пространственно-временные изменения насаждений и составлять краткосрочный прогноз развития очага.

Региональный анализ не только дает информацию о масштабах повреждения пихтовых лесов, но и позволяет проводить комплексное исследование различных факторов, влияющих на дальнейшее распространение вредителя по обширной территории Сибири, проводить лесопатологическое районирование на уровне субъектов РФ и на уровне крупных экономических районов. Кроме того, на основе полученной аналитической информации и картографического отображения становится возможным прогноз и предупреждение рисков возникновения новых очагов, мониторинг и контроль их развития, прогнозирование и составление рекомендаций по созданию адаптационных мер защиты пихтовых лесов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aukema J. E., Leung B., Kovacs K., Chivers C., Britton K. O., Englin J., Frankel S. J., Haight R. G., Holmes T. P., Liebhold A. M., McCullough D. G., Von Holle B. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States // PLoS ONE. – 2011. – Vol. 6, Issue. 9. – P. 1–7.
2. Non-native invasive species and plant pathogens in British Isles / Pimental D. (ed.). // Biological Invasions. Economic and Environmental Costs of Alien Plants, Animal and Microbe species. – Boca Raton, USA : CRC Press, 2002. – P. 151–155.
3. Pimental D., Zuniga R., Morrison D. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States // Ecological Economics. – 2005. – Vol. 52. – P. 273–288.
4. Van Lierop P., Lindquist E., Sathyapala S., Franceschini G. Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events // Forest Ecology and Management. – 2015. – Vol. 352. – P. 78–88.

5. Kharuk V. I., Im S. T., Ranson K. J., Yagunov M. N. Climate-Induced Northerly Expansion of Siberian Silkmoth Range // *Forests*. – 2017. – Vol. 8 (8). – P. 301. doi: 10.3390/f8080301.
6. Кривец С. А., Керчев И. А., Бисирова Э. М., Пашенова Н. В., Демидко Д. А., Петько В. М., Баранчиков Ю. Н. Уссурийский полиграф в лесах Сибири: распространение, биология, экология, выявление и обследование поврежденных насаждений : метод. пособие. – Томск-Красноярск : УМИУМ, 2015. – 48 с.
7. Bystrov S. O., Antonov I. A. First record of the four-eyed beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) from Irkutsk Province, Russia // *Entomological Review*. – 2019. – Vol. 98 (1). – P. 54–55. doi: 10.1134/S001387381901007X.
8. Bykov R., Kerchev I., Demenkova M., Ryabinin A., Ilinsky Y. Sex-Specific Wolbachia Infection Patterns in Populations of *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae: Scolytinae) // *Insects*. – 2020. – Vol. 11. – P. 547. doi: 10.3390/insects11080547.
9. Баранчиков Ю. Н., Демидко Д. А., Лаптев А. В., Петько В. М. Динамика отмирания деревьев пихты сибирской в очаге уссурийского полиграфа // *Лесной Вестник*. – 2014. – № 6. – С. 132–138.
10. Мельник М. А., Волкова Е. С., Бисирова Э. М., Кривец С. А. Оценка эколого-экономического ущерба лесопользованию, вызванного инвазией уссурийского полиграфа в темнохвойные экосистемы // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2018. – № 6. – С. 58–75. doi: 10.21266/2079-4304.2018.225.58-75.
11. Кривец С. А., Бисирова Э. М., Волкова Е. С., Дебков Н. М., Керчев И. А., Мельник М. А., Никифоров А. Н., Чернова Н. А. Технология мониторинга пихтовых лесов в зоне инвазии уссурийского полиграфа в Сибири : методическое пособие. – Томск : УМИУМ, 2018. – 74 с.
12. Хорук В. И., Двинская М. Л., Демидко Д. А., Будник У. А. Пространственно-временная динамика размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных древостоях Алтая // *Сибирский экологический журнал*. – 2016. – Т. 32, № 6. – С. 843–854.
13. Pavlova I. N., Litovkava Y. A., Golubeva D. V., Astapenkoc S. A., Chromogina P. V., Usoltseva Y. V., Makolova P. V., Petrenkova S. M. Mass Reproduction of *Polygraphus proximus* Blandford in Fir Forests of Siberia Infected with Root and Stem Pathogens: Monitoring, Patterns, and Biological Control // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2020. – Vol. 13, No. 1. – P. 71–84.
14. Кривец С. А., Бисирова Э. М., Керчев И. А., Пац Е. Н., Чернова Н. А. Трансформация таежных экосистем в очаге инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в Западной Сибири // *Российский журнал биологических инвазий*. – 2015. – № 1. – С. 41–63.
15. Об утверждении порядка проведения лесопатологических обследований и формы акта лесопатологического обследования [Электронный ресурс] : Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России) № 480 от 16.09.2016. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
16. Волкова Е. С., Кривец С. А., Мельник М. А. Районирование территории Томской области по опасности распространения уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandf) – нового вредителя пихты сибирской // *География и природные ресурсы*. – 2014. – № 3. – С. 40–47.
17. Арбузов С. А., Хлебникова Е. П., Никитин В. Н. Автоматизированная идентификация и определение породного состава древесных растений по материалам цифровой многозональной аэросъемки лесных массивов // *Вестник СГУГиТ*. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 68–76.
18. Тарасов А. В. Современные методы оперативного картографирования нарушений лесного покрова // *Вестник СГУГиТ*. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 201–213.
19. Крылов А. М., Соболев А. А., Владимирова Н. А. Выявление очагов короеда-типографа в московской области с использованием снимков Landsat // *Лесной вестник*. – 2011. – № 4. – С. 54–60.
20. Полевой А. В., Хумала А. Э., Щербаков А. Н., Налдеев Д. Ф. Подходы к определению степени повреждения ельников в результате вспышки массового размножения короеда-типографа с помощью дистанционных методов // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2009. – № 187. – С. 240–248.
21. Марков Н. Г., Маслов К. А., Керчев И. А., Токарева О. С. Сверточная нейронная сеть для сегментации пораженных деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов // *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : сборник материалов VII Международной научной конференции*. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2020. – С. 102–105.



22. Баранчиков Ю. Н., Кривец С. А. О профессионализме при определении насекомых: как рассмотрели появление нового агрессивного вредителя пихты в Сибири // Экология Южной Сибири и сопредельных территорий. – Абакан : Изд-во ГОУ ВПО «Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова». – Выпуск 14. В 2-х томах. – Т. 1. – 2010. – С. 50–52.

23. Kononov A., Ustyantsev K., Blinov A., Fet V., Baranchikov Yu. N. Genetic diversity of aboriginal and invasive populations of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) // Agricultural and Forest Entomology. – 2016. – Vol. 18(3). – P. 294–301. doi: 10.1111/afe.12161.

24. Методы мониторинга вредителей и болезней леса / под общ. ред. В. К. Тузова. – М. : ВНИИЛМ, 2004. – 200 с.

25. Robin N. T., Cobb R. C., Christopher G. A., Cunniff N. J. Management of invading pathogens should be informed by epidemiology rather than administrative boundaries // Ecological Modelling. – 2016. – Vol. 324. – P. 28–32.

26. Mehta S., Haight R., Homans F., Polasky S., Venette R. Optimal detection and control strategies for invasive species management // Ecological Economics. – 2007. – Vol. 61 (2-3). – P. 237–245.

Получено 24.03.2021

© И. А. Керчев, Е. С. Волкова, М. А. Мельник, 2021

## POSSIBILITIES OF GIS FOR STUDYING THE PROCESSES OF DISTRIBUTION OF THE USSURIYSK POLYGRAPH IN THE FIR FORESTS OF SIBERIA

**Ivan A. Kerchev**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskoy Prospekt St., Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (3822)49-18-55, e-mail: ivankerchev@gmail.com

**Elena S. Volkova**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskoy Prospekt St., Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Senior Researcher, Laboratory of Self-Organization of Geosystems, phone: (3822)49-22-23, e-mail: elevolko@yandex.ru

**Mariya A. Melnik**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskoy Prospekt St., Tomsk, 634055, Russia, Ph. D., Researcher, Laboratory of Self-Organization of Geosystems, phone: (3822)49-22-23, e-mail: melnik-m-a@yandex.ru

In recent decades, the Siberian fir forests have been seriously damaged by the invasive bark beetle of Far Eastern origin, the Ussuri polygraph *Polygraphus proximus* Blandf. The damage from the impact of the pest is expressed in monetary value and in the loss of many ecological functions of forest ecosystems. Technologies for organizing ground monitoring of the spread of the pest are successfully tested by Siberian scientists, and with the involvement of GIS technologies, they can provide a spatio-temporal analysis of the scale of the negative processes occurring. The purpose of this article is to show the capabilities of GIS technologies in combination with remote sensing in studying the processes of invasion of the Ussuri polygraph using the example of forest areas in the Tomsk region. It is shown that the geoinformation approach to the study of the fir forests state in the centers of mass reproduction of the pest makes it possible to create a series of thematic maps reflecting large-scale spatial and temporal changes in plantations and to give a short-term forecast of the development of the centers. The high efficiency of this approach is shown in the local analysis of the centers' development and to assess the dynamics of mass reproduction of the pest at the forestry level. Based on the built-in analytical information and cartographic display, it becomes possible to predict the emergence of new centers, monitor and control their development.

**Keywords:** Ussuri polygraph, Siberian fir trees, GIS technologies, mapping, breeding center, forest monitoring, remote sensing, forest pests, forecast

REFERENCES

1. Aukema, J. E., Leung, B., Kovacs, K., Chivers, C., Britton, K. O., Englin, J., Frankel, S. J., Haight, R. G., Holmes, T. P., Liebhold, A. M., McCullough, D. G., & Von Holle, B. (2011). Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States. *PLoS ONE*, 6(9), 1–7.
2. Pimentel, D. (2002). Non-native invasive species and plant pathogens in British Isles. Biological Invasions. In *Economic and Environmental Costs of Alien Plants, Animal and Microbe species* (pp. 151–155). Boca Raton, USA: CRC Press.
3. Pimentel, D., Zuniga, R., & Morrison, D. (2005). Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*, 52, 273–288.
4. Van Lierop, P., Lindquist, E., Sathyapala, S., & Franceschini, G. (2015). Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. *Forest Ecology and Management*, 352, 78–88.
5. Kharuk, V. I., Im, S. T., Ranson, K. J., & Yagunov, M. N. (2017). Climate-Induced Northerly Expansion of Siberian Silkmoth Range. *Forests*, 8(8), 301 p. doi: 10.3390/f8080301.
6. Krivec, S. A., Kerchev, I. A., Bisirova, Je. M., Pashenova, N. V., Demidko, D. A., Pet'ko, V. M., & Baranchikov, Ju. N. (2015). *Ussurijskij poligraf v lesah Sibiri: rasprostranenie, biologija, jekologija, vyjavlenie i obsledovanie povrezhdennyh nasazhdenij [Four-eyed fir bark beetle in Siberian forests: distribution, biology, ecology, detection and survey of damaged stands]*. Tomsk–Krasnoyarsk: UMIUM Publ., 48 p. [in Russian].
7. Bystrov, S. O., & Antonov, I. A. (2019). First record of the four-eyed beetle *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) from Irkutsk Province, Russia. *Entomological Review*, 98(1), 54–55. doi: 10.1134/S001387381901007X.
8. Bykov, R., Kerchev, I., Demenkova, M., Ryabinin, A., & Ilinsky, Y. (2020). Sex-Specific Wolbachia Infection Patterns in Populations of *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae: Scolytinae). *Insects*, 11(8), P. 547. doi: 10.3390/insects11080547.
9. Baranchikov, Ju. N., Demidko, D. A., Laptev, A. V., & Pet'ko, V. M. (2014). Dynamics of Siberian fir dieback in the outbreak area of the four-eyed fir bark beetle. *Lesnoj Vestnik [Forestry Bulletin]*, 6, 132–138 [in Russian].
10. Melnik, M. A., Volkova, E. S., Bissirova, Je. M., & Krivec, S. A. (2018). Ecological-economic evaluation of damage caused to forest use by the invasion of four-eyed fir bark beetle in Siberia. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Engineering Academy]*, 6, 58–75. doi: 10.21266/2079-4304.2018.225.58-75 [in Russian].
11. Krivec, S. A., Bisirova, Je. M., Volkova, E. S., Debkov, N. M., Kerchev, I. A., Melnik, M. A., Niki-forov, A. N., & Chernova, N. A. (2018). *Tehnologija monitoringa pihtovyh lesov v zone invazii ussurijskogo poligrafa v Sibiri [Technology for monitoring fir forests in the zone of invasion of the Four-eyed fir bark beetle in Siberia]*. Tomsk: UMIUM Publ., 74 p. [in Russian].
12. Horuk, V. I., Dvinskaja, M. L., Demidko, D. A., & Budnik, U. A. (2016). Siberian Silk Moth Outbreak Dynamics in Dark-Coniferous Forests of the Altai. *Sibirskij jekologicheskij zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 32(6), 843–854 [in Russian].
13. Pavlova, I. N., Litovka, Y. A., Golubeva, D. V., Astapenkoc, S. A., Chromogina, P. V., Usoltseva, Y. V., Makolova, P. V., & Petrenkova, S. M. (2020). Mass Reproduction of *Polygraphus proximus* Blandford in Fir Forests of Siberia Infected with Root and Stem Pathogens: Monitoring, Patterns, and Biological Control. *Contemporary Problems of Ecology*, 13(1), 71–84.
14. Krivets S. A., Bisirova E. M., Kerchev I. A., Pats E. N., & Chernova N. A. (2015). Transformation of taiga ecosystems in Western Siberia in invasion focus of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae). *Rossijskij zhurnal biologicheskikh invazij [Russian Journal of Biological Invasions]*, 1, 41–63 [in Russian].
15. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation (Ministry of Natural Resources of Russia) No. 480 of September 16, 2016. On the approval of the procedure for conducting forest pathological examinations and the form of the forest pathological examination report. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
16. Volkova, E. S., Krivec, S. A., & Mel'nik, M. A. (2014). Regionalization of Tomsk oblast according to the propagation hazard of the Ussuri bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandf.), a new pest of Siberian fir. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]*, 3, 40–47 [in Russian].

17. Arbuzov, S. A., Khlebnikova, E. P., & Nikitin, V. N. (2020). Automated identification and determination of the breed composition of wood by materials of digital multispectral aerial survey of forests. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(4), 68–76 [in Russian].
18. Tarasov, A. V. (2020). Traditional and modern methods of satellite images processing for operational mapping of forest cover disturbances. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(3), 201–213 [in Russian].
19. Krylov, A. M., Sobolev, A. A., & Vladimirova, H. A. (2011). Revealing of centers *Ips typographus* in Moscow region with use of pictures Landsat. *Lesnoj Vestnik [Forestry Bulletin]*, 4, 54–60 [in Russian].
20. Polevoj, A. V., Humala, A. Je., Shherbakov, A. N., & Naldeev, D. F. (2009). Approaches to determining the degree of damage to spruce forests as a result of an outbreak of mass reproduction of *Ips typographus* using remote sensing methods. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Academy]*, 187, 240–248 [in Russian].
21. Markov, N. G., Maslov, K. A., Kerchev, I. A., & Tokareva, O. S. (2020). Convolutional neural network for segmentation of affected fir trees in images from unmanned aerial vehicles. In *Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Proceedings of VII International Scientific Conference: Regional Problems of Remote Sensing of the Earth]* (pp. 102–105). Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ. [in Russian].
22. Baranchikov, Yu. N., & Krivets, S. A. (2010). About professionalism in identifying insects: how the emergence of a new aggressive pest of fir in Siberia. In *Ekologiya Yuzhnoy Sibiri i sopredel'nykh territoriy: Vyp. 14, t. 1 [Ecology of Southern Siberia and Adjacent Territories: Issue 14, Vol. 1]* (pp. 50–52). Abakan: Khakass State University named after N. F. Katanova Publ. [in Russian].
23. Kononov, A., Ustyantsev, K., Blinov, A., Fet, V., & Baranchikov, Yu. N. (2016). Genetic diversity of aboriginal and invasive populations of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae). *Agricultural and Forest Entomology*, 18(3), 294–301. doi: 10.1111/afe.12161.
24. Tuzov, V. K. (Ed.). (2004). *Metody monitoringa vreditel'ey i bolezney lesa [Methods for monitoring forest pests and diseases]*. Moscow: VNIILM Publ., 200 p. [in Russian].
25. Robin, N. T., Cobb, R. C., Christopher, G. A., & Cunniffa, N. J. (2016). Management of invading pathogens should be informed by epidemiology rather than administrative boundaries. *Ecological Modelling*, 324, 28–32.
26. Mehta, S., Haight, R., Homans, F., Polasky, S., & Venette, R. (2007). Optimal detection and control strategies for invasive species management. *Ecological Economics*, 61(2-3), 237–245.

Received 24.03.2021

© I. A. Kerchev, E. S. Volkova, M. A. Melnik, 2021