

Е.С. ВОЛКОВА, И.А. КЕРЧЕВ, С.А. КРИВЕЦ, М.А. МЕЛЬНИК

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия, elevolko@yandex.ru,
ivankerchev@gmail.com, krivec_sa@mail.ru, melnik-m-a@yandex.ru

ОПЫТ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ИНВАЗИЙ ЧУЖЕРОДНЫХ НАСЕКОМЫХ-ВРЕДИТЕЛЕЙ ЛЕСА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ СРЕДСТВАМИ ГИС

С использованием традиционных и современных методов картографии изучены биологические инвазии в темных лесах Западной Сибири опасных чужеродных стволовых насекомых-дендрофагов — уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandf.) и союзного короеда (*Ips amitinus* (Eichh.)). Наряду с мониторингом инвазионных процессов, проводимым в Томской области и включавшим широкое обследование ее территории для получения фактографических данных о степени деградации поврежденных лесов, особое внимание при картографировании уделялось применению средств ГИС-технологий. На примере некоторых аспектов данных инвазий представлены особенности и возможности составления, а также использования картографического материала в научных и прикладных целях. Показана высокая результативность пространственно-временной оценки наблюдаемых процессов и явлений на локальном уровне методами современного картографирования с привлечением материалов наземного мониторинга и ортофотоснимков с беспилотных летательных аппаратов. С помощью ГИС дана наглядная пространственная оценка степени деградации поврежденных вредителями лесов, лесопатологического состояния насаждений и размера ущерба от воздействия инвазивных дендрофагов на модельных территориях. Выявлено, что для Томской области наибольшая степень риска от экспансии уссурийского полиграфа и союзного короеда наблюдается в южных и юго-восточных районах. Использование функционала ГИС позволило создать серию оригинальных тематических карт, отражающих различные аспекты пространственных особенностей инвазий, что позволяет делать краткосрочные прогнозы зарождения и распространения очагов вредителя, проводить мониторинг и контроль их развития, а также выявлять направленность процесса распространения вредителей на разных уровнях территориальной иерархии.

Ключевые слова: Томская область, насекомые-дендрофаги, очаги массового размножения, аэрофотосъемка, мониторинг инвазионных процессов.

E.S. VOLKOVA, I.A. KERCHEV, S.A. KRIVETS, M.A. MELNIK

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, pr. Akademicheskii, 10/3, Russia, elevolko@yandex.ru,
ivankerchev@gmail.com, krivec_sa@mail.ru, melnik-m-a@yandex.ru

EXPERIENCE OF MAPPING INVASIONS BY FOREST ALIEN PEST INSECTS IN WESTERN SIBERIA USING GIS TOOLS

Biological invasions into dark coniferous forests of Western Siberia by dangerous alien stem pests: four eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandf.) and small spruce bark beetle (*Ips amitinus* Eichh.) were studied using traditional and modern methods of mapping. Along with the monitoring of invasion carried out in Tomsk oblast, which included a wide survey of its territory to obtain factual data on the degree of degradation of damaged forests, special attention was paid to the use of GIS technologies. Using an example of some aspects of these invasions, the features and possibilities of compiling as well as using map material for scientific and applied purposes are presented. The high efficiency of spatiotemporal assessment of observed processes and phenomena at the local level by using modern mapping methods with the involvement of ground monitoring material and orthophotos from unmanned aerial vehicles is shown. A spatial assessment of the degree of degradation, vital state, and the amount of damage caused by invasive bark beetles in model areas using GIS is made. The highest degree of risk from the expansion of *P. proximus* and *I. amitinus* was revealed for the southern and southeastern parts of Tomsk oblast. The use of the GIS functionality made it possible to create a series of original thematic maps that reflect various aspects of the spatial features of invasions, which permits short-term forecasts of the origin and spread of pest foci, monitoring and control of their development, as well as identifying the direction of the pest spread process at different levels of the territorial hierarchy.

Keywords: Tomsk oblast, dendrophagous insects, outbreak foci, aerophotography, monitoring of invasive processes.

ВВЕДЕНИЕ

Инвазии чужеродных видов насекомых-дендрофагов в лесные экосистемы и возникновение вспышек их массового размножения во вторичном ареале, приводящее к экологическому и экономическому ущербу, фиксируются во многих регионах мира [1–4]. Не составляет исключения и Российская Федерация [5], на территории которой практически ежегодно выявляются новые виды инвазивных насекомых, связанных с древесными породами [6].

В Сибири в текущем столетии существенное негативное влияние на состояние таежных лесов оказали два инвазивных вида стволовых насекомых из подсемейства короедов (Scolytinae), проникших в регион, вероятнее всего, в результате антропогенного заноса с древесными материалами по Транссибирской железнодорожной магистрали. В 2008–2010 гг. в Томской, Кемеровской областях и Красноярском крае был обнаружен дальневосточный вселенец — уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus* Blandf.), вызвавший беспрецедентное усыхание пихтовых лесов [7]. Позднее инвайдер был выявлен в Новосибирской области, Алтайском крае, республиках Алтай и Хакасия [8], а в последние годы и в Байкальском регионе [9, 10]. Второй инвазивный вредитель — союзный короед (*Ips amitinus* Eichh.) — вид европейского происхождения. В 2019 г. он был впервые идентифицирован в Томской и Кемеровской областях, где вызвал массовую гибель деревьев в припоселковых кедровниках — ценных орехопромысловых лесах, генетических резерватах кедра сибирского (*Pinus sibirica*) и ООПТ регионального значения [11]. Общая площадь распространения союзного короеда в регионах инвазии в Западной Сибири составляет более 30 тыс. км² с тенденцией дальнейшего расширения [12].

Инвазии обоих видов наиболее интенсивно изучались в Западной Сибири сотрудниками Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН на территории Томской области. При этом, наряду с мониторингом инвазионного процесса, включавшим широкое скрининговое обследование районов области на предмет обнаружения чужеродных видов, изучение динамики их расселения, оценку риска возникновения массового размножения, влияния на состояние древостоев и биоразнообразие экосистем в целом, особое внимание уделялось методам, средствам накопления, обработки и представления данных исследований с применением фактографических и геоинформационных систем (ГИС) [13].

Для комплексного анализа экспансии короедов на первый план выдвигаются следующие задачи: прогнозирование распространения вредителей; районирование территории по условиям природной среды, способствующим распространению инвайдеров; оценка степени деградации поврежденных лесов; оценка возможных рисков для сферы лесопользования; прогнозирование распространения вредителей. В решении этих задач важным элементом технологии мониторинга инвазий является картографическое отображение происходящих процессов в пространственно-временном аспекте на основе современных ГИС-технологий [14, 15].

Цель данной статьи — изложение опыта авторского опыта картографирования инвазий изученных видов насекомых с использованием средств ГИС. На примере некоторых аспектов инвазии авторы попытались показать особенности и возможности составления и использования картографического материала, в том числе в прикладных целях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процедура картографирования, разработанная авторами, предусматривает несколько основных этапов. На начальном этапе разрабатывается структура базы данных ГИС-проекта, включающая картографический архив, каталог тематических баз данных и материалы аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения. В качестве прикладного картографического обеспечения используется универсальный программный пакет ArcGIS, функционал которого позволяет обрабатывать данные с помощью встроенных модулей пространственного анализа. Картографический архив проекта состоит из электронных слоев — шейп-файлов: «Топографическая основа», «Схемы лесохозяйственного районирования и административно-территориального деления», «Размещение пробных площадок», «Местоположения населенных пунктов и метеостанций», «Схема дорожно-транспортной сети». При этом цифровые слои соответствуют определенному классу пространственных объектов, а пространственные геоданные приводятся к единой системе координат WGS 84.

Важный этап картографирования — это наполнение базы данных необходимой информацией. Поскольку процессы инвазии хорошо отслеживаются по динамике деградации древесных насаждений, тематические данные включают следующие показатели: основные таксационные характеристики насаждений (тип леса, породный и возрастной состав, запас, средний и текущий прирост, класс бони-

тета и др.); лесопатологические характеристики насаждений (степень усыхания, средневзвешенная категория состояния, средняя скорость отмирания деревьев в очагах вредителей).

Для анализа природно-климатических факторов, способствующих распространению вредителя, в базу данных включены также метеопоказатели: суммы эффективных температур, при которых формируется оптимум для жизнедеятельности вредителей в период активного размножения; сильные ветры, увеличивающие массовые ветровалы и буреломы и создающие обильную кормовую базу для короеда; пожары, которые ослабляют устойчивость лесов, что способствует распространению вредителя [16].

Основная информация для формирования баз данных была получена в ходе полевых исследований сотрудников Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН, проводимых на специально заложенных пробных площадях в насаждениях, поврежденных уссурийским полиграфом и союзным короедом. Дополнительными источниками информации служили данные Государственного лесного реестра Томской области за 2021 г. [17], сообщения на сайте Филиала ФБУ «Российский центр защиты леса» — «Центр защиты леса Томской области» [18, 19], метеоданные ООО «Расписание погоды» [20].

Отдельная база данных создана для материалов, полученных в ходе дистанционных наблюдений за очагами массового размножения инвайдеров. Наземный мониторинг таежных лесов не всегда транспортно доступен, и в качестве альтернативного варианта может применяться метод дистанционного зондирования с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что определено в Приказе Минприроды России № 480 от 16.09.2016 [21]. Основным его преимуществом является возможность аналитической обработки изображений, полученных в результате облета территории, в разных геоинформационных средах. Эти задачи наиболее наглядно и действенно реализуются методами современного картографирования с привлечением ГИС-технологий [15]. Преимущество их использования состоит в возможностях оперативной обработки, компактного хранения и пространственного отображения большого объема информации, как по степени деградации лесных древесных насаждений, так и по популяционной динамике инвазионных вредителей.

В наших исследованиях аэрофотосъемка местности осуществлялась с помощью беспилотного летательного аппарата (тип — крыло) Supercam S350f (ООО «Беспилотные технологии», г. Ижевск) и квадрокоптеров DJI Phantom 3 Standart и DJI P4 Multispectral. Интерпретация фотоснимков проводилась в среде геоинформационной системы Quantum GIS, с квадрокоптера DJI P4 Multispectral — в программном пакете DJI Terra.

Завершением проектирования пространственной базы данных становится создание серии электронных тематических карт, сформированных исходя из поставленных задач и возможностей ГИС. Опыт показывает, что одна из особенностей картографирования процесса инвазии заключается, прежде всего, в том, что для каждого определенного класса задач применяются разные методы наблюдения, масштабы и стили картографического отображения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Картографическая оценка последствий инвазии союзного короеда в локальном местообитании. Детальная локальная оценка состояния насаждений в очагах размножения вредителя лучше всего реализуется с помощью ортофотосъемки с дальнейшей процедурой верификации полученных данных результатами наземных наблюдений. Ортофотосъемка районов очагов вредителей проводилась на высоте 500 м с радиусом территориального охвата в 250 м дроном Supercam S350f. Детализированная ортофотосъемка контрольных участков на постоянных пробных площадях осуществлялась с высоты 120 м с использованием квадрокоптеров.

На снимке, сделанном в результате облета пробного участка Протопоповского припоселкового кедровника в Томском районе (рис. 1), хорошо заметны поврежденные кроны — характерный признак усыхания кедра в результате жизнедеятельности союзного короеда. Для анализа изображений состояния пораженных деревьев выделялись три класса их жизненного состояния с использованием опыта разработки моделей глубокого обучения U-Net [22], позволяющих решать задачи семантической сегментации изображений, разрабатываемых в ИМКЭС СО РАН совместно с Отделением информационных технологий Томского политехнического университета [23, 24]. Верификация материалов дешифрирования данными наземного мониторинга показала достаточно высокую степень совпадения, разница варьировалась в пределах 1 %.

Картографирование насаждения по степени повреждения уссурийским полиграфом. Карта степени поврежденности пихтового леса под воздействием чужеродного стволового вредителя (рис. 2) создана на основе обработанных аэрофотоснимков модельных площадок в Прикульском участковом лесничестве

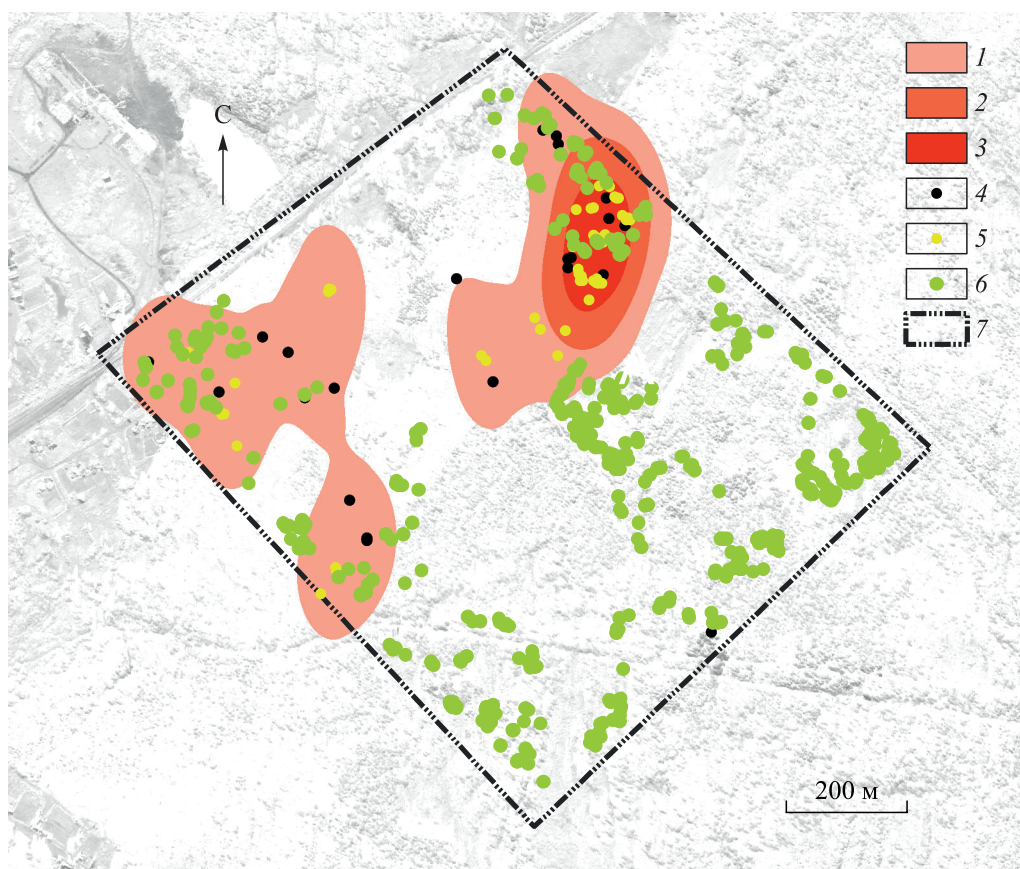
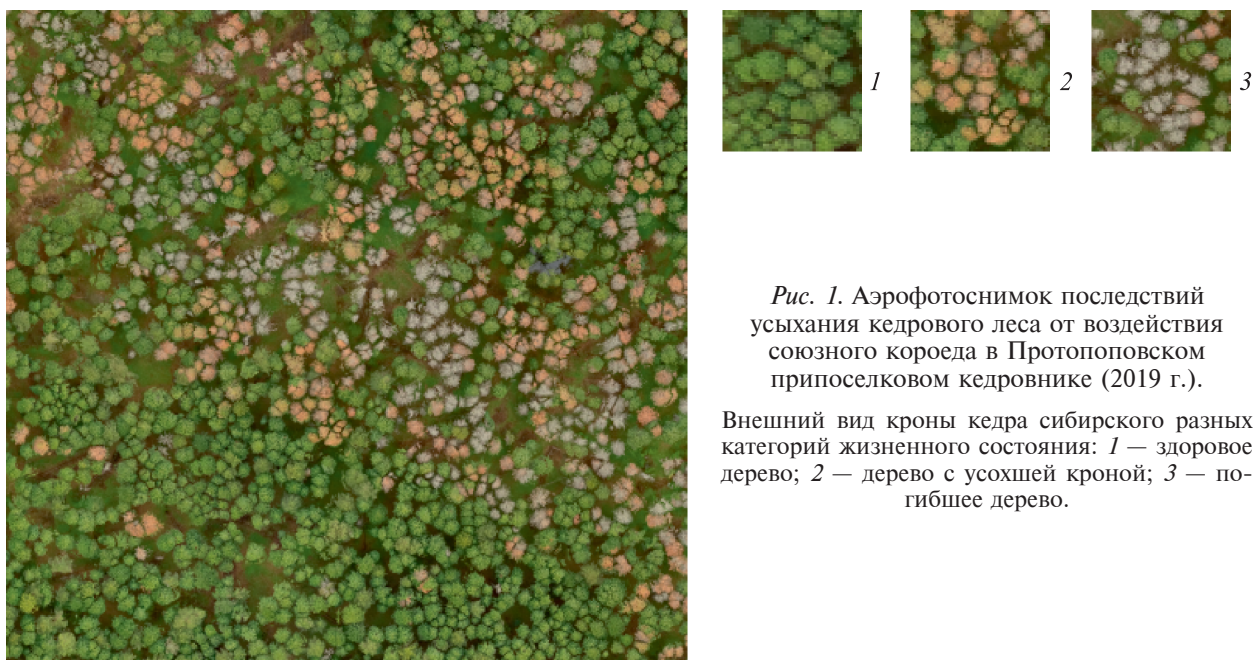


Рис. 2. Поврежденность пихтового леса в очагах размножения уссурийского полиграфа на пробной площадке в Прикульском участковом лесничестве на 12.08.2017 г.

Плотность повреждений пихты в древостое: 1 — низкая, 2 — средняя, 3 — сильная; состояние пихты: 4 — погибшее дерево, 5 — ослабленное дерево, 6 — здоровое дерево, 7 — границы пробной площадки.

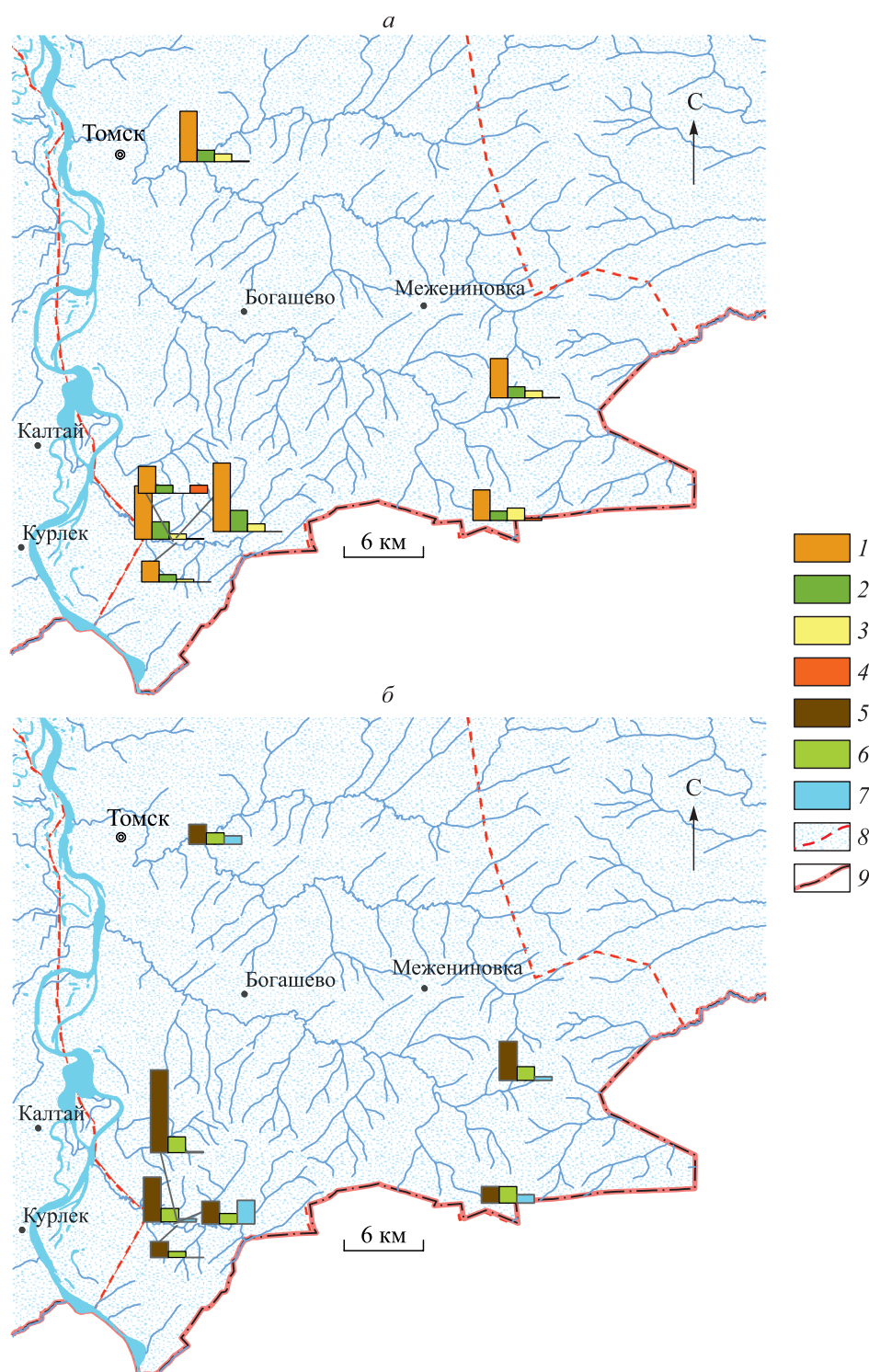


Рис. 3. Оценка ущерба от воздействия уссурйского полиграфа для модельных территорий Томского района Томской области.

a — прямой ущерб от потери древесных ресурсов: 1 — древесины; 2 — пихтовой лапки; 3 — живицы; 4 — новогодних пихт. *б* — косвенный ущерб от потери экосистемных функций леса: 5 — углероддепонирующей; 6 — кислородопродуцирующей; 7 — водозащитной. Границы: 8 — Томского района, 9 — Томской области.

Корниловского лесничества Томской области, где уссурийский полиграф нанес ощутимый урон пихтарникам. Использование инструментов интерполяции и плотности ядер в среде ArcGIS позволило рассчитать количество заселенных вредителем деревьев, оценить лесопатологическое состояние насаждения, зафиксировать зарождение локальных куртин усыхания и их слияние в более крупный очаг [23].

Картографирование размеров ущерба от уссурийского полиграфа. Картографическое отображение прямого и косвенного ущерба демонстрируется на рис. 3 для семи пробных площадей, заложенных в лесах Томского лесничества Томской области. В основу расчетов взяты результаты многолетних полевых наблюдений за состоянием древостоев пихты сибирской на исследуемых площадях. Определенный по авторской методике [25] размер ущерба лесопользованию и экосистемным функциям леса от инвазии уссурийского полиграфа в пихтарниках Томской области в период наибольшего развития вспышки размножения (2011–2017 гг.) оценен в 1,4 млрд руб. Установлено, что высокие значения фактического прямого ущерба от вредителя — от 17 до 24 тыс. руб/га наблюдаются для спелых и перестойных насаждений, где повреждено более 70 % пихты, и основной прямой ущерб исходит от потери древесины.

Картографирование риска возникновения очагов размножения союзного короеда. Пространственный анализ при изучении инвазии лесных вредителей предполагает использование важного географического метода — районирования. На разработанной авторами карте районирования Томской области (рис. 4) отображен риск распространения союзного короеда в регионе с учетом показателя благоприятности погодных условий в разрезе лесничеств. Выявленные особенности наблюдаемой вспышки размножения союзного короеда позволяют прогнозировать рост площади очагов инвайдера по всей территории области и проследить направленность процесса. Видно, что наибольшая степень риска от

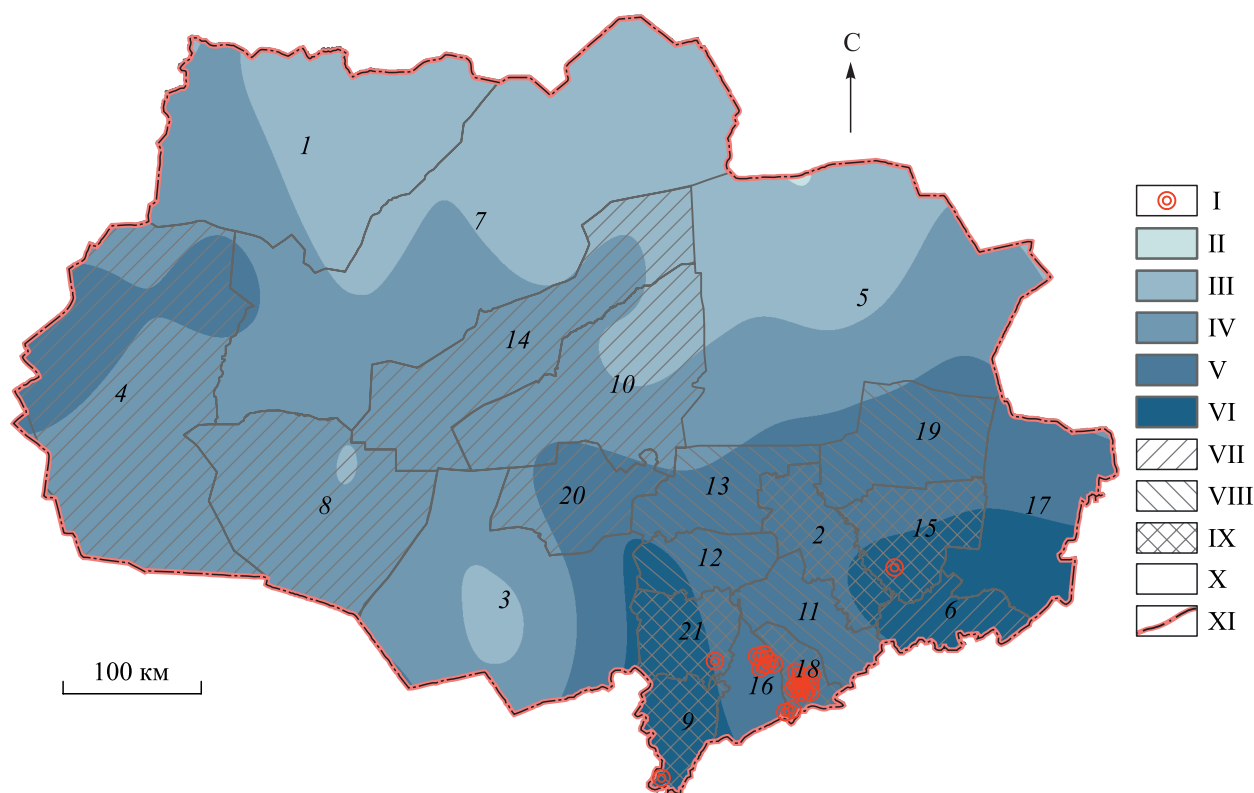


Рис. 4. Районирование территории Томской области по риску возникновения очагов массового размножения союзного короеда.

I — активные очаги. Среднее значение годовой суммы эффективных температур $< +10^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{C}$: II — 550–650, III — 650–700, IV — 700–800, V — 800–870, VI — 870–950. Степень риска: VII — низкая, VIII — средняя, IX — высокая. Границы: X — лесничеств, XI — Томской области. Лесничества: 1 — Александровское, 2 — Асиновское, 3 — Бакcharское, 4 — Васюганское, 5 — Верхнекетское, 6 — Зырянское, 7 — Каргасокское, 8 — Кедровское, 9 — Кожевниковское, 10 — Колпашевское, 11 — Корниловское, 12 — Кривошеинское, 13 — Молчановское, 14 — Парабельское, 15 — Первомайское, 16 — Тимирязевское, 17 — Тегульдское, 18 — Томское, 19 — Улукюльское, 20 — Чаинское, 21 — Шегарское.

экспансии союзного короеда в кедровых лесах наблюдается для южных и юго-восточных частей Томской области. Основная волна возможного распространения инвазивного вредителя направлена с юго-запада и юго-востока на северо-запад, что совпадает с пространственным распределением показателя благоприятных условий для жизнедеятельности вредителя.

Приведенными примерами не ограничивается набор карт, составленных авторами с применением ГИС-технологий для пространственного отражения и других аспектов инвазии чужеродных видов в леса Томской области. К настоящему времени созданы карты комплексной характеристики опасности распространения уссурийского полиграфа в лесничествах области [13]; основных факторов возможного распространения инвайдера на территории области [14]; локальных очагов его массового размножения в Межениновском участковом лесничестве Томского лесничества в 2011–2017 гг. [15]; карта санитарно-оздоровительных мероприятий, проведенных в очагах размножения в Межениновском участковом лесничестве [13]; разработано районирование территории Томской области по уровню вредоносности уссурийского полиграфа и предлагаемое лесозащитное районирование области с учетом инвазии данного вида [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт картографирования, полученный авторами при изучении инвазий чужеродных насекомых-вредителей леса, позволяет сделать ряд выводов.

Пространственно-временную оценку процессов инвазии целесообразно проводить с помощью комплекса методов, дополняющих друг друга: наземного мониторинга, создания и дешифрирования космо- и аэрофотоснимков, средств ГИС. Это создает условия для получения достоверной полномасштабной оценки лесопатологического состояния насаждений, более обоснованного прогноза зарождения и распространения очагов на разных уровнях территориальной иерархии.

Использование ГИС-технологий обеспечивает как детализацию, так и генерализацию информации, что дает возможность рассматривать явления и процессы в динамике, связывать разномасштабные данные между собой. Пошаговая детализация позволяет характеризовать особенности происходящих процессов при укрупнении масштаба, в то время как генерализация направлена на обобщение имеющейся информации при его уменьшении [26]. Сформированная в рамках ГИС структура базы данных обеспечивает возможность добавлять и изменять количественные и качественные показатели в оперативном режиме и на их основе строить различные интегральные тематические карты.

Анализ созданных тематических карт позволяет оценить масштабы повреждения лесов, исследовать факторы, способствующие распространению вредителей, проводить лесопатологическое районирование на уровне субъектов Российской Федерации, делать прогноз возникновения новых очагов и оценку ущербов, наносимых инвайдерами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, регистрационный номер проекта 121031300226-5, FWRG-2021-0003, FWRG-2022-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pimentel D. Non-native invasive species and plant pathogens in British Isles // Biological Invasions. Economic and Environmental Costs of Alien Plants, Animal and Microbe Species. — Boca Raton, USA: CRC Press, 2002. — P. 151–155.
2. Lovett G.M., Canham C.D., Arthur M.A., Weathers K.C., Fitzhugh R.D. Forest ecosystems responses to exotic pests and pathogens in eastern North America // Bioscience. — 2006. — Vol. 56. — P. 395–405.
3. Kenis M., Auger-Rosenberg M.-A., Roques A., Timms L., Péré C., Cock M.J.W., Setelle J., Augustin S., Lopez-Vaamonde C. Ecological effects of invasive alien insects // Biological Invasions. — 2008. — Vol. 11, N 1. — P. 21–45.
4. 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, Iss. 9. — P. 1–7.
5. Масляков В.Ю., Ижевский С.С. Инвазии растительноядных насекомых в европейскую часть России. — М.: Изд-во Ин-та географии РАН, 2011. — 272 с.
6. Musolin D.L., Kirichenko N.I., Karpun N.N., Mandelshtam M.Y., Selikhovkin A.V., Zhuravleva E.N., Aksenenko E.V., Golub V.B., Kerchev I.A., Vasaitis R., Volkovitch M.G. Invasive pests of forests and urban trees in Russia: origin pathways, damage, and management // Forests. — 2022. — Vol. 13, Iss. 521. — P. 60. DOI: Idoi.org/10.3390/f13040521

7. Баранчиков Ю.Н., Петько В.М., Астапенко С.А., Акулов Е.Н., Кривец С.А. Уссурийский полиграф — новый агрессивный вредитель пихты в Сибири // Вестн. МГУЛ. Лесной вестник. — 2011. — Вып. 4. — С. 78–81.
8. 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: методическое пособие. — Томск; Красноярск: УМИУМ, 2015. — 48 с.
9. 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, N 1. — P. 54–55. DOI: 10.1134/S0013873819001007X
10. Kerchev I., Bykov R., Ilinsky Yu. Expansion of the secondary range of *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae, Scolytinae): invasion of Khamar-Daban mountains (Republic of Buryatia) // Acta Biologica Sibirica. — 2023. — N 9. — P. 1–11. DOI: 10.5281/zenodo.7679805
11. Керчев И.А., Мандельштам М.Ю., Кривец С.А., Илинский Ю.Ю. Союзный короед *Ipsamitus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) — новый чужеродный вид в Западной Сибири // Энтомологическое обозрение. — 2019. — Т. 98, № 3. — С. 592–599. DOI: 10.1134/S0367144519030092
12. Керчев И.А., Кривец С.А., Бисирова Э.М., Смирнов Н.А. Распространение союзного кородея *Ipsamitus* (Eichhoff, 1872) в Западной Сибири // Рос. журнал биологических инвазий. — 2021. — № 4. — С. 77–84. DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-4-77-84
13. 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.
14. Волкова Е.С., Кривец С.А., Мельник М.А. Районирование Томской области по опасности распространения уссурийского полиграфа — нового вредителя пихты сибирской // География и природ. ресурсы. — 2014. — № 3. — С. 40–47.
15. Керчев И.А., Волкова Е.С., Мельник М.А. Возможности ГИС для изучения процессов инвазии распространения уссурийского полиграфа в пихтовых лесах Сибири // Вестн. Сибир. гос. ун-та геосистем и технологий. — 2021. — Т. 26, № 4. — С. 44–54. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-4-44-54
16. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Волкова Е.С., Мельник М.А., Смирнов Н.А., Пац Е.Н. Вспышка массового размножения и оценка риска распространения союзного кородея в кедровых лесах Томской области // Лесоведение. — 2023. — № 2. — С. 116–131. DOI: 10.31857/S0024114823020031, END: AKFNMY
17. Государственный лесной реестр Томской области за 2021 г. Департамент лесного хозяйства Томской области [Электронный ресурс]. — <https://deples.tomsk.gov.ru>. (дата обращения 26.12.2022).
18. Прогнозируем санитарное состояние лесов на I полугодие 2022 г. [Электронный ресурс]. — <https://tomsk.rcfh.ru/pressceter/novosti/progniziruem-sani-tarnoe-sostoyanie-lesov-na-1-polugodie-2022-goda/10.01.2022> (дата обращения 26.12.2022).
19. Опасный вредитель кедровых лесов Сибири [Электронный ресурс]. — <https://tomsk.rcfh.ru/pressceter/novosti/orasnuu-veditel-kedrovykh-lesov-sibiri> (дата обращения 26.12.2022).
20. Расписание погоды. gr5.ru [Электронный ресурс]. — http://gr5.ru/-Архив_погоды_ (дата обращения: 28.04.2023).
21. Об утверждении порядка проведения лесопатологических обследований и формы акта лесопатологического обследования. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России) № 480 от 16.09.2016. Зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации. Рег. № 45200 от 13 января 2017 г. [Электронный ресурс]. — <https://base.garant.ru/71586766/> (дата обращения 16.11.2022).
22. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // arXiv preprint. arXiv:1505.04597. — 2015 [Электронный ресурс]. — <https://arxiv.org/abs/1505.04597> (дата обращения 16.11.2022).
23. Керчев И.А., Маслов К.А., Марков Н.Г., Токарева О.С. Семантическая сегментация поврежденных деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18, № 1. — С. 116–126. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126
24. Марков Н.Г., Маслов К.А., Керчев И.А., Токарева О.С. Модели U-NET для семантической сегментации поврежденных деревьев сосны сибирской кедровой на снимках с БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2022. — Т. 19, № 1. — С. 65–77. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-65-77
25. Мельник М.А., Волкова Е.С., Бисирова Э.М., Кривец С.А. Оценка эколого-экономического ущерба лесопользованию, вызванного инвазией уссурийского полиграфа в темнохвойные экосистемы Сибири // Изв. Санкт-Петербург. лесотехнич. академии. — 2018. — № 225. — С. 58–75. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.225.58-75
26. Методы мониторинга вредителей и болезней леса / Под общ. ред. В.К. Тузова. — М.: Изд-во Всерос. науч.-исслед. ин-та лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2004. — 200 с.

Поступила в редакцию 02.06.2023

После доработки 24.07.2023

Принята к публикации 11.10.2023