

УДК 574.1;630*18

DOI: 10.15372/GIPR20240305

В.И. ВОРОНИН, А.В. ВЕРХОЗИНА, Т.А. МИХАЙЛОВА, Т.И. МОРОЗОВА, В.А. ОСКОЛКОВ,
А.П. СИЗЫХ, Д.А. КРИВЕНКО, С.Г. КАЗАНОВСКИЙ, А.В. РУДИКОВСКИЙ, О.В. КАЛУГИНА,
И.Н. ЕГОРОВА, О.В. ШЕРГИНА, О.А. ЧЕРНЫШЕВА, И.А. АНТОНОВ

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, Россия, bioin@sifibr.irk.ru, allaverh@list.ru, mikh@sifibr.irk.ru,
ti.morozova@mail.ru, vosk@sifibr.irk.ru, alexander.sizykh@gmail.com, krivenko.irk@gmail.com,
skazanovsky@mail.ru, rudikovalex@mail.ru, olignat32@inbox.ru, egorova@sifibr.irk.ru,
sherolga80@mail.ru, helga8408@mail.ru, patologi@sifibr.irk.ru

**ИССЛЕДОВАНИЯ СИБИРСКОГО ИНСТИТУТА
ФИЗИОЛОГИИ И БИОХИМИИ РАСТЕНИЙ СО РАН
В ОБЛАСТИ БИОРАЗНООБРАЗИЯ И ЛЕСНОЙ ЭКОЛОГИИ**

Обобщаются результаты многолетних комплексных исследований, проводимых СИФИБР СО РАН по изучению состава, структуры, динамики биоразнообразия Сибири и сопредельных регионов на уровне популяций, видов, биоценозов, экосистем и выявлению ответных реакций организмов и их сообществ на изменение условий среды при воздействии природных и антропогенных факторов. Оценена секвестеризация диоксида углерода хвойными лесами, произрастающими на территории Байкальского природного региона. Произведена реконструкция лесных пожаров в Забайкалье на основе древесно-кольцевой хронологии с ежегодным разрешением в 351 год. Обосновано понятие парагенеза, которое понимается как развитие растительных сообществ, по структурно-динамической организации не относящихся к зональному типу (или высотному поясу) растительности. Полученные данные могут служить информационной базой при определении основных направлений региональной экологической политики, имеют значение для оценки современного состояния биоразнообразия Байкальской Сибири, его изменений в условиях пресса антропогенных факторов, разработки мер его сохранения.

Ключевые слова: Байкальская Сибирь, биоразнообразие, парагенез, антропогенные факторы, лесные пожары, болезни леса.

V.I. VORONIN, A.V. VERKHOZINA, T.A. MIKHALOVA, T.I. MOROZOVA, V.A. OSKOLKOV, A.P. SIZYKH,
D.A. KRIVENKO, S.G. KAZANOVSKII, A.V. RUDIKOVSKII, O.V. KALUGINA, I.N. EGOROVA,
O.V. SHERGINA, O.A. CHERNSHEVA, I.A. ANTONOV

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 132, Russia, bioin@sifibr.irk.ru, allaverh@list.ru, mikh@sifibr.irk.ru,
ti.morozova@mail.ru, vosk@sifibr.irk.ru, alexander.sizykh@gmail.com, krivenko.irk@gmail.com,
skazanovsky@mail.ru, rudikovalex@mail.ru, olignat32@inbox.ru, egorova@sifibr.irk.ru,
sherolga80@mail.ru, helga8408@mail.ru, patologi@sifibr.irk.ru

**RESEARCH BY SIBERIAN INSTITUTE
OF PLANT PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY SB RAS
IN THE FIELD OF BIODIVERSITY AND FOREST ECOLOGY**

This article summarizes the results of long-term integrated research performed by SIPPB of SB RAS studying composition, structure and dynamics of biodiversity in Siberia and adjacent regions at the level of populations, species, biocoenoses, and ecosystems and revealing of responses of organisms and their coenoses to changes in environmental conditions caused by natural and anthropogenic factors. The sequestration of carbon dioxide by conifer forests growing on the territory of Baikal Natural Region was estimated. Forest fires in Transbaikalia were reconstructed on the basis of tree-ring chronology with an annual resolution of 351 years. The concept of paragenesis was justified as it characterizes the formation of phytocoenoses which by their structural-dynamic organization are not related to a zonal type (or altitudinal belt) of vegetation. The data obtained can serve

as an information base while determining basic vectors of regional ecological policy, and they are important for the assessment of the present state of biodiversity in Baikalian Siberia and its changes under the conditions of anthropogenic factor press as well as for development of measures for its protection.

Keywords: *Baikalian Siberia, biodiversity, paragenesis, anthropogenic factors, forest fires, forest diseases.*

ВВЕДЕНИЕ

При создании Сибирского отделения АН СССР было предусмотрено развитие существовавших и создание новых институтов биологического профиля. В их числе в Иркутске при Восточно-Сибирском филиале АН СССР был создан отдел биологии и затем, в 1961 г., на его основе — Восточно-Сибирский биологический институт СО АН СССР. В 1966 г. он был реорганизован в Сибирский институт физиологии и биохимии растений (СИФИБР АН СССР). Первым его директором с 1966 по 1976 г. был известный физиолог растений профессор, в последующем чл.-корр. АН СССР Федор Эдуардович Реймерс.

В первые годы в институте выполнялись работы по изучению продуктивности растительных ресурсов, физиологических основ жизнедеятельности растений в условиях Сибири, вредителей леса, разрабатывались научные основы повышения плодородия почв. В это время был спроектирован и создан первый отечественный фитотрон — станция искусственного климата, что значительно расширило экспериментальные возможности института.

С приходом в институт молодых исследователей стали активно развиваться современные направления — клеточная и молекулярная биология, биохимия растений, культура клеток и тканей, биоинженерия. Особое внимание развитию этих направлений уделял чл.-корр. РАН Рюрик Константинович Саляев, возглавлявший институт с 1976 по 2002 г. Благодаря его усилиям получили развитие молекулярно-биологические исследования, комплексное изучение физиологии клетки и функционирования клеточных мембран, исследования в области биохимии фитогормонов, биохимии морфогенеза физиологической генетики. Стали развиваться генная и клеточная инженерия, фитоиммунология. Интенсивно проводились комплексные экологические исследования, в том числе в сфере агроэкологии и экологии наземных природных комплексов.

Одним из старейших направлений деятельности СИФИБР СО РАН является изучение флоры высших растений Сибири и сопредельных территорий, процессов ее антропогенной трансформации — как внедрения чужеродных видов, так и сокращения ареалов редких видов. Начало этих исследований было связано с созданием 23 ноября 1954 г. лаборатории флоры и гербария отдела биологии Восточно-Сибирского филиала АН СССР. Она была организована крупным ботаником-систематиком, флористом, флорогенетиком проф., чл.-корр. АН УССР Михаилом Григорьевичем Поповым.

Через десять лет после кончины М.Г. Попова, в 1964 г., лабораторию флоры и растительных ресурсов Восточно-Сибирского биологического института СО АН СССР возглавил его ученик — Леонид Иванович Малышев. В 1978 г. он вместе с большей частью сотрудников лаборатории переехал в Новосибирск. Свою деятельность они продолжили в Центральном сибирском ботаническом саду СО АН СССР, туда же был перевезен и гербарий сосудистых растений. В Иркутске остались двое сотрудников — Леонид Владимирович Бардунов и Александра Андреевна Киселева, сохранилась небольшая часть гербарной коллекции сосудистых растений, около 10 тыс. гербарных листов и бриологический гербарий. Это позволило продолжить в СИФИБР СО РАН флористическое направление как группа Гербарий, которая в 2018 г. была преобразована в отдел биоразнообразия и биологических ресурсов. На сегодня Гербарий СИФИБР СО РАН (IRK) насчитывает более 250 тыс. гербарных образцов со всех континентов, кроме Австралии и Антарктиды. Он состоит из двух отделов — мохового и сосудистых растений.

Результаты флористических работ опубликованы в таких монографиях, как «Конспект флоры Иркутской области (сосудистые растения)» [1], «Споровые растения Прибайкальского национального парка» [2], «Мхи и печеночники лесов Сибири» [3] и др. В последние годы усилиями сотрудников СИФИБР СО РАН с использованием современных биохимических, молекулярно-генетических и биоинформационных методов достигнуты большие успехи в фундаментальных исследованиях устойчивости и динамики наземных экосистем в меняющихся климатических условиях, сохранении биологического разнообразия Байкальской Сибири. Полученные результаты открывают перспективы разработки методов и подходов для сохранения редких и исчезающих растений и лесных экосистем Байкальского региона.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одно из направлений исследований в СИФИБР СО РАН — изучение состава, структуры, динамики биоразнообразия Байкальской Сибири на уровне видов, биоценозов, экосистем и выявление ответных реакций организмов на изменение условий среды при воздействии антропогенных факторов. Байкальская Сибирь, как уникальный регион площадью более 1,5 млн км², особо значима в плане изучения биологического разнообразия, поскольку является важнейшим биogeографическим рубежом в Северной Азии, где проходят границы крупных ботанико-географических областей (Южно-Сибирской, Байкало-Джугджурской, Центрально-Азиатской), существенно различающихся по природно-ландшафтным условиям. В современный период в регионе увеличиваются площади территорий, где наблюдается тенденция к деградации ландшафтов и сокращению биоразнообразия. Получены данные, подтверждающие тенденцию к сокращению фиторазнообразия. В настоящее время в регионе около 10 % видов высших сосудистых растений являются редкими, реликтовыми, эндемичными. Из них 54 вида находятся под угрозой исчезновения, более десяти — исчезнувшие, поэтому крайне важно зарезервировать имеющийся генетический фонд, и одним из эффективных путей является создание новых особы охраняемых природных территорий [4, 5].

Отделом «Биоразнообразие и биологические ресурсы» подведены итоги многолетних исследований бриофлоры Иркутской области. Составлен конспект, включающий 552 вида и восемь внутривидовых таксонов мохобразных из 116 родов, 85 семейств и семи классов. Печеночники составляют 137 видов и пять разновидностей из 66 родов, 35 семейств и двух классов — маршанциевых (*Marchantiopsida*) и юнгерманниевых (*Jungermanniopsida*). Листостебельные мхи представлены 415 видами и тремя разновидностями из 174 родов, 50 семейств и пяти классов: сфагновых (*Sphagnopsida*), андреевых (*Andreaeopsida*), политриховых (*Polytrichopsida*), тетрафисовых (*Tetraphidopsida*) и бриевых (*Bryopsida*).

После более чем 30-летнего перерыва в СИФИБР СО РАН возобновились кариосистематические исследования растений. При кариологическом скрининге особое внимание уделяется ранее неизученным или малоизученным в кариологическом отношении видам, эндемикам, реликтам, чужеродным видам. Использование данных по кариологии перспективно, эффективно и многогранно. Оно позволяет выявить таксоны с кариологическим полиморфизмом; разобраться в ряде систематических вопросов; выявить диплоидные расы в пределах ареала полиморфных видов или диплоидных представителей в группе близкородственных видов; обнаружить наиболее древнюю часть ареала вида или группы видов; проводить кариофлористические исследования [6–10].

Совместно с Институтом динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН создана информационно-аналитическая система по фиторазнообразию Байкальской Сибири — интернет-ресурс, являющийся одновременно базой данных коллекций, инструментом для анализа флор, картирования ареалов видов [11]. На этой платформе проводится ревизия гербарной коллекции и осуществляется ее оцифровка, отвечающая всем международным стандартам. В настоящий момент в базу данных Гербария СИФИБР СО РАН (IRK) внесено почти 80 тыс. учетных записей, отсканировано более 40 тыс. гербарных листов сосудистых растений.

В связи со стремительно возрастающей в глобальном масштабе потерей фиторазнообразия, вызванной деятельностью человека, актуальна разработка новых способов охраны аборигенных видов растений, которые предполагают не только экстенсивное сохранение местообитаний видов, но и комплексные работы по изучению и сохранению редких видов растений. Осуществляется поиск и картирование их местонахождений, изучение и мониторинг состояния популяций, исследуется биология, проводятся молекулярно-генетические исследования, оцениваются необходимые меры по сохранению вида, поддерживается банк семян, разрабатываются методически и нормативно обоснованные варианты сохранения популяций редких видов в естественных условиях произрастания.

Сотрудники института являются редакторами, авторами и иллюстраторами Красных книг различного ранга — Российской Федерации, Иркутской области, Республики Бурятия, Забайкальского края и др.

С участием сотрудников отдела «Биоразнообразие и биологические ресурсы» проведены оценка видового риска, анализ распространения и пробелов в сохранении всех 217 эндемичных видов сосудистых растений флоры Алтайской горной страны (АГС) [12], природоохраный статус которых оценен на глобальном уровне с помощью пакета ConR. Проведена количественная оценка географических закономерностей и центров эндемизма по всей территории АГС.

Помимо сокращения численности популяций местных видов, вплоть до выпадения некоторых из состава флоры, антропогенное воздействие на флору ярко проявляется в процессе ее адвенцизации —

заноса и расселения чужеродных (адвентивных) видов за пределами их естественных ареалов. Это может привести к существенным изменениям биологического разнообразия, последствия которых трудно предсказуемы и во многих известных случаях отрицательны.

С помощью информационно-аналитической системы на основе условного времени вхождения во флору адвентивных видов-неофитов, включая инвазионные, проанализированы данные за 155 лет (1867–2022 гг.) по внедрению адвентивных видов на территорию Байкальской Сибири. За это время на исследуемую территорию было занесено 426 видов. Данные демонстрируют не только увеличение числа чужеродных видов с конца XIX в. по настоящее время в Байкальской Сибири, но и возрастание скорости заноса, особенно явно проявившееся начиная с конца прошлого века. Число видов, занесенных в среднем в год, выросло с 1–2 в конце XIX века до 8–9 в конце XX – начале XXI в.

Среди адвентивных видов особую группу составляют инвазионные растения — натурализовавшиеся виды, которые обладают способностью к активному распространению и внедрению в естественные или полуестественные сообщества. На основе оценки степени натурализации и способности внедрения в естественные сообщества адвентивных видов выявлены инвазионные (в том числе потенциально инвазионные) виды для трех субъектов Российской Федерации, входящих в Байкальскую Сибирь. Их распределение по территории Байкальской Сибири отражено на рис. 1.

Результаты изучения инвазионных видов отражены в «Черной книге Сибири» [13], исследовании инвазионных растений России [14], глобальной базе натурализовавшейся чужеродной флоры (GloNAF) [15], анализе наблюдаемых и ожидаемых паттернов натурализации европейских растений по всему миру [16].

Для оценки ресурсного потенциала диких представителей яблони (*Malus Mill.*) в качестве источников генетической изменчивости для селекции яблок проведены исследования углеводного состава тканей плодов культурных и диких яблонь, которые произрастают на обширной территории Азиатской России [17].

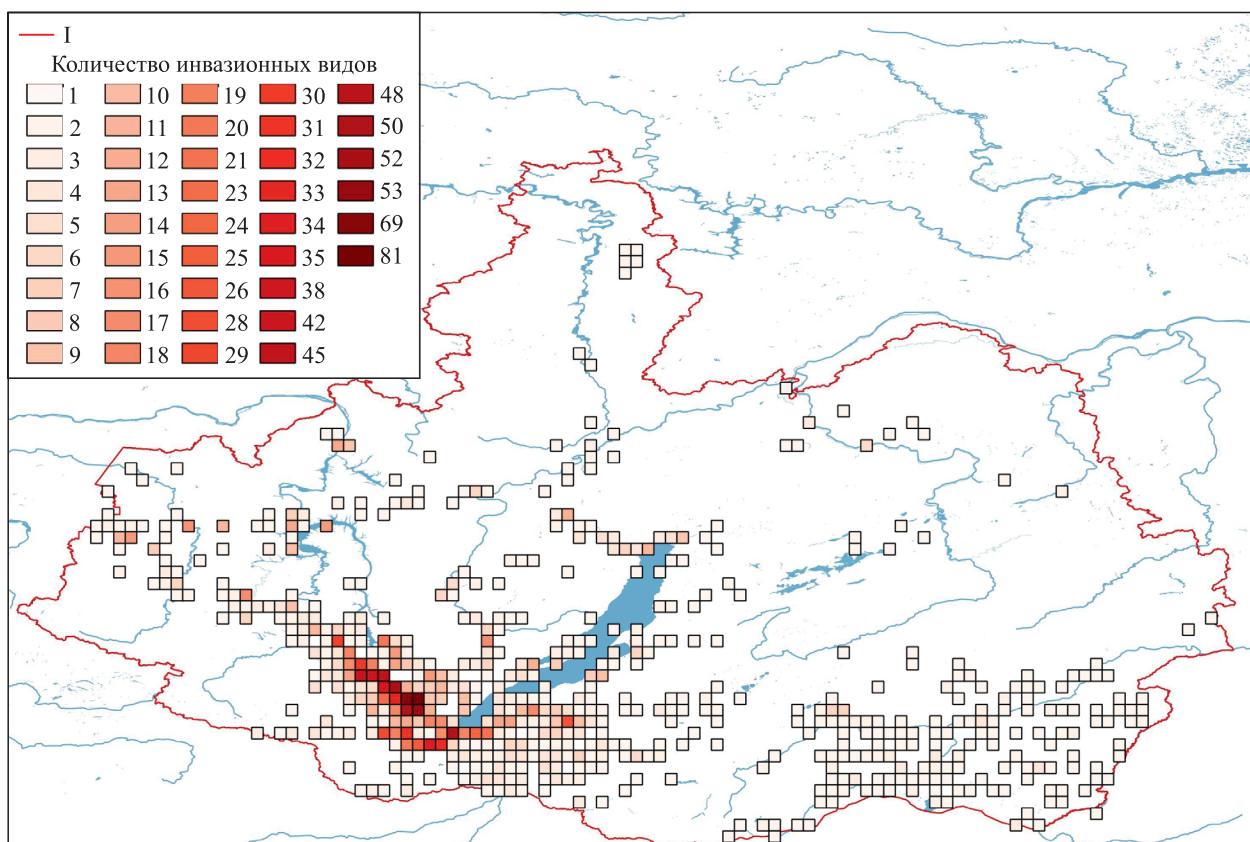


Рис. 1. Распределение инвазионных видов растений по территории Байкальской Сибири.

I — границы Байкальской Сибири.

Исследованиями лаборатории природных и антропогенных экосистем установлено, что в Байкальской Сибири на территориях разной степени нарушенности значительная экосистемная функция принадлежит альгофлоре. С применением современных методов исследований, включая трансмиссионную электронную микроскопию и молекулярную генетику, получены и обобщены данные о распределении и структурных особенностях альгогруппировок Байкальского региона, роли их представителей в биогеохимических потоках элементов [18, 19]. При исследовании фотоавтотрофных наземных водорослей, одних из базовых в блоке продуцентов и индикаторов качества среды, выявлены пионерные группировки на каменистых субстратах, имеющие особую значимость на начальных этапах почвообразования. Впервые показано высокое видовое разнообразие водорослей надземного яруса таежных биогеоценозов. Получены новые для региона данные о структуре альгокомплексов горных экосистем, в их составе обнаружены цианопрокариоты, обладающие устойчивостью к интенсивному ультрафиолетовому излучению. Выявлены виды, перспективные для использования в биотехнологических целях для восстановления деградирующих почв, получения ценных биологически активных веществ.

Изучение лабораторией биоиндикации экосистем растительных сообществ переходных природных условий (контакта сред) в структуре растительности, включая и Байкальский регион, способствует выявлению современных тенденций развития, предыстории ее формирования в границах природных зон в целом. Сообщества контакта сред выступают региональной моделью индикации существующих процессов и прошедших изменений в растительном покрове. Эти изменения характеризуют тенденции спонтанной динамики и антропогенных деструкций среды при определенных экологических условиях. Здесь всегда будет актуальным вопрос: какова природа зональности, поясности, экстраzonальности, а также генезиса среды, определяющей зональность и экстраzonальность в организации растительности? На современном этапе такие исследования имеют не только региональный, но и континентальный характер как актуальная проблема современной физической географии, биогеографии, биогеоценологии и экологии.

Эктоны в структуре растительности — сообщества, отражающие взаимоотношения зональных типов растительности (или высотных поясов) в пространстве. Значительное изменение в соотношениях тепла и влаги влечет за собой изменение границ природных зон (или высотных поясов) как определенных сред с пространственным «расширением» или «сужением» (при определенных условиях среды) экотонов как межзональных (или межвысотно-поясных) образований [20].

Растительные сообщества средней части бассейна р. Селенги (Юго-Западное Прибайкалье) на стыке горной лесостепи и степной зоны Центрально-Азиатской (Даурско-Монгольской) подобласти степной области отражают межзональный эктон. На это указывают результаты анализа геоэлементного, экотипологического (экотипы) составов, поясно-зональных групп видов растений и состав ведущих семейств. По видовому составу сообщества ключевого участка больше тяготеют к лесостепной зоне. Для данных территорий типичны зональные лесостепные почвы. Изменение климата последних десятилетий в этом регионе проявляется в повышении влажности и температуры, а также в снижении антропогенного пресса, что способствует как облесению степных пространств внутри лесостепной зоны, так и продвижению древесных растений в зону зональных степей. Таким образом, наметились тенденции к смещению зоны лесостепи в широтном направлении с перспективой на формирование светлохвойных лесов зонального типа.

Растительные сообщества хр. Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) и Байкальского хребта (Северное Прибайкалье) являются примерами высотно-поясных экотонов, характеризующих изменение верхней границы леса вследствие климатогенной сукцессии растительности переходных природных условий в регионе в последние десятилетия, связанных с изменением влажности и температуры. Это способствует процессам продвижения древесных пород в подгольцовый пояс и горную тундру с формированием экотонов в зонах контакта лес—подгольцовый пояс, лес—горная тундра.

Парагенез в структуре растительности Байкальского региона — это реально, наряду с экотонами, существующие природные объекты, связанные общностью происхождения на конкретной территории. Парагенез — сообщества, отражающие структуру и динамику растительности регионально-топологического уровня ее организации в границах зональных типов растительности (или высотных поясов) за определенный период времени на конкретной территории [20]. Растительные сообщества — эктоны и сообщества, отражающие парагенез (объект), позволяют индицировать прошлые и современные условия среды, направленность формирования растительных сообществ и могут быть моделями в прогнозе развития растительности обширных территорий. Результаты многолетних исследований растительных сообществ контакта разных физико-географических условий [20–35] послужили основой

вой для анализа современной структурно-динамической и пространственно-временной организации растительности обширных территорий на фоне изменчивости климата и направленности влияний антропогенных факторов в пространстве и времени.

В структуре растительности Байкальского региона наличествует парагенез (объект), проявляющийся в двух формах. Первая форма — в границах определенного типа растительности, когда в таежной зоне формируются степные сообщества, образованные видами растений, характерными для двух зональных типов растительности: лесного (таежного) и степного. В нашем случае это территории ключевого участка (Приольхонье), центральной части западного побережья Байкала и Тункинская котловина. Типично это и для северо-западного побережья оз. Байкал и Баргузинской котловины. Вторая форма — в границах определенного типа зональной растительности, где сообщества включают растения, типичные для многих типов растительности (и высотных поясов) разных природных зон Восточной Сибири. В составе сообществ зональной горной полидоминантной тайги присутствуют виды, свойственные подгольцовому поясу: кедровый стланик (*Pinus pumila* (Pall.) Regel), рододендрон золотистый (*Rhododendron aureum* Georgi); горной тундры: кассиопея вересковидная (*Cassiope ericooides* (Pall) D. Don), водяника черная (*Empetrum nigrum* L.), филлодоце голубая (*Phyllodoce caerulea* (L.) Bab.); сухих псаммофитных (чай блестящий (*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski), овсяница ленская (*Festuca lenensis* Drobow)) степей североазиатского типа в одном сообществе. Такие растительные сообщества, характеризующие парагенез в структуре растительности, присущи ключевому участку — бару о. Ярки (северное побережье Байкала). Также они отмечены и в прибрежной полосе центральной части восточного побережья оз. Байкал.

В условиях парагенеза (объекта) в границах зональных типов растительности, часто отражающих природную зону (или в границах высотных поясов), как определенных сред, различных по соотношению тепла и влаги, при изменении климата происходит «сжимание» природного объекта (к примеру, облесение экстразональных степей внутри зональной тайги) в конкретный период времени на определенном пространстве. Это было отмечено на примерах ключевых участков растительности Байкальского региона — в Приольхонье, Тункинской и Баргузинской котловинах. Также может происходить и пространственное «расширение» данного природного объекта (парагенеза) в случае усиления процессов ксерофитизации (при повышении сухости климата), растительности таежной зоны, как и показано на примере сообществ северного побережья — бара о. Ярки.

Особенно актуальна для Байкальского региона проблема сохранения и рационального использования лесных ресурсов, которые можно рассматривать как один из главнейших элементов его экономической базы. Для исследований лабораторией природных и антропогенных экосистем создана сеть мониторинга лесов, охватывающая большую часть территории региона. На основе обширного фактического материала проведена оценка жизненного состояния сосновых лесов по токсикологическим, физиолого-биохимическим, биогеохимическим показателям, в том числе по активности фотосинтеза, уровню антиоксидантных компонентов, изменению морфометрических параметров древесных растений, степени нарушенности питательного режима почвы [36, 37]. Результаты исследований свидетельствуют об ослаблении физиологического состояния лесообразующих видов хвойных деревьев на значительных площадях вследствие воздействия техногенных эмиссий, негативных факторов урбанизации, нерационального лесопользования. Показано, что воздействие техногенных поллютантов на клеточном уровне инициирует развитие окислительного стресса и избыточное образование активных форм кислорода в ассимилирующей фитомассе деревьев. Установлено, что в предотвращении окислительного повреждения органов ассимиляции ведущая роль принадлежит биохимической системе защиты растений, которая слагается из большого комплекса ферментативных и низкомолекулярных антиоксидантов. Определенный уровень этих соединений обеспечивает высокий адаптивный потенциал растения в целом [38]. Выраженное подавление адаптационных процессов древесных растений происходит при возрастании загрязнения ассимиляционных органов до критического, когда коэффициент накопления в них токсикантов (*Zbt*) превышает фоновый в 10–12 раз. Во взаимосвязи с показателями физиолого-биохимического ослабления деревьев и уровня их загрязнения рассмотрены изменения стока углерода. Показано снижение ассимиляции углерода (от 20 до 60 % от фонового уровня) лесными экосистемами Предбайкалья, подверженными влиянию аэротехногенного загрязнения [39]. Одновременно с изменением баланса углерода нарушаются биогеохимические циклы многих других химических элементов за счет их значительного привноса в лесные экосистемы с выбросами [40]. При изучении сравнительной резистентности основных компонентов лесных биогеоценозов обнаружено, что почва обладает более высокой устойчивостью к техногенному загрязнению, чем фитоценоз. Защитные свойства почвы обусловлены наличием выраженных процессов хемосорбции

элементов-поллютантов и их иммобилизации путем образования соединений с низкой скоростью миграции в верхних горизонтах почвенного профиля. Кроме того, в нижележащих горизонтах обнаружены геохимические барьеры, осаждающие многие токсиканты в нерастворимых формах [41].

Проведено картографическое обобщение результатов исследований лесных экосистем региона, загрязняемых атмосферными промышленными выбросами множественных источников. Составлены среднемасштабные карты, отражающие степень техногенного загрязнения лесов (рис. 2) и угнетения их жизненного состояния (рис. 3). Часть исследований по данному направлению выполнена в рамках международного проекта EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia) [42].

Проведены комплексные исследования урбоэкосистем [43]. Разработана методология оценки их состояния на основе обобщения результатов биогеохимических исследований в пределах крупных промышленных городов Байкальского региона (Иркутска, Ангарска, Усолья-Сибирского, Шелехова и др.). С применением многоуровневого статистического анализа выявлены высокинформативные

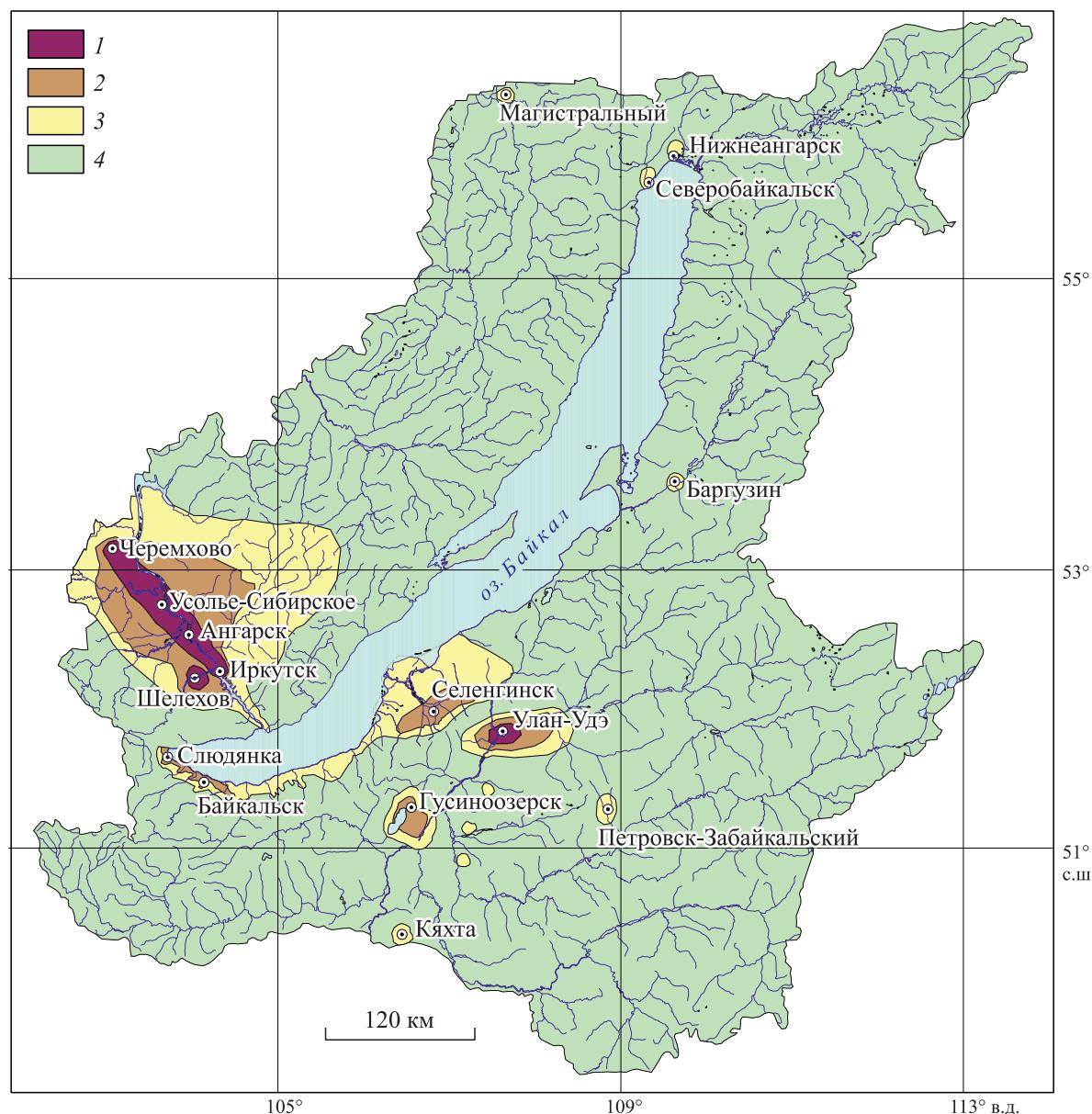


Рис. 2. Карта загрязнения сосновых лесов Байкальской природной территории.

Загрязнение: 1 — сильное, 2 — среднее, 3 — слабое. 4 — фоновые (незагрязненные) древостоя.

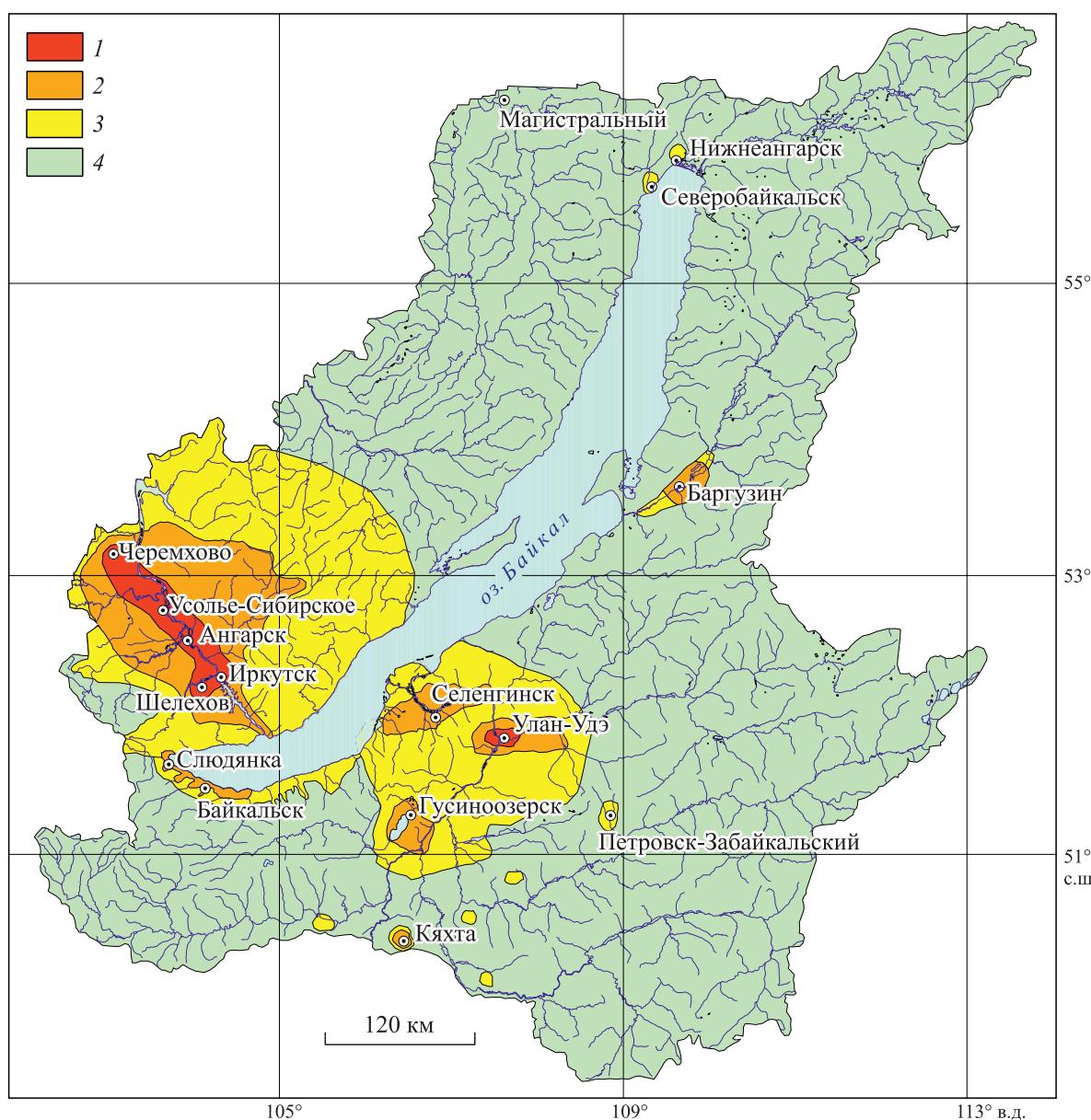


Рис. 3. Карта угнетения сосновых лесов Байкальской природной территории.

Угнетение: 1 — сильное, 2 — среднее, 3 — слабое. 4 — фоновые древостои.

индикаторы, характеризующие степень трансформации почвенного покрова и нарушенности растительных сообществ на урбанизированных территориях с разной степенью техногенного загрязнения и рекреационной нагрузки. Установлены пути миграции поллютантов (тяжелых металлов, серы, хлора, фтора) и расположение геохимических барьеров в горизонтах почвенного профиля, показано поступление токсичных ионов в корневую систему растений не только из верхних гумусовых горизонтов, но и из нижележащих минеральных. Разработан подход для оценки регулирующих и поддерживающих экосистемных функций/услуг древесных растений и почв в промышленных городах Предбайкалья. Полученные результаты свидетельствуют о широком диапазоне изменений экосистемных услуг, оказываемых основными компонентами городских лесов, при этом большим нарушением и снижением (от 40 до 90 %) характеризуются регулирующие функции/услуги. Проведено картографирование территорий Иркутска и Ангарска согласно разработанной оценочной диагностической шкале регулирующих и поддерживающих экосистемных функций/услуг.

Проведены исследования восстановительных сукцессий фитоценозов и почвенного покрова в пределах крупных техногенных отвалов химического и нефтехимического производства вблизи Усолья-Сибирского и Ангарска [44]. Установлено, что процесс техногенного почвообразования проходит последовательно инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые, гумусово-аккумулятивные стадии развития эмбриоземов. Каждой из стадий соответствует определенная восстановительная сукцессия фитоценозов. Среди растений выявлены виды-концентраты токсикантов, пригодные для использования в целях фиторемедиации.

Лабораторией биондикации экосистем в рамках международного проекта PreReal (Improving PREdictability of circumboREAL forest fire activity and its ecological and socio-economic impacts through multi-proxy data comparisons) произведена реконструкция лесных пожаров в Забайкалье на основе древесно-кольцевой хронологии с ежегодным разрешением в 351 год (1666–2017 гг.), основанной на пожарных шрамах стволов сосны (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.). Была оценена корреляция между солнечной активностью, напряженностью засухи (индекс Палмера — PDSI), данными о ежемесячной засухе (июль) и лесными пожарами. Установлено, что возникновение пожаров сопряжено с засухами, когда количество солнечных пятен уменьшается [45] (рис. 4). Результаты

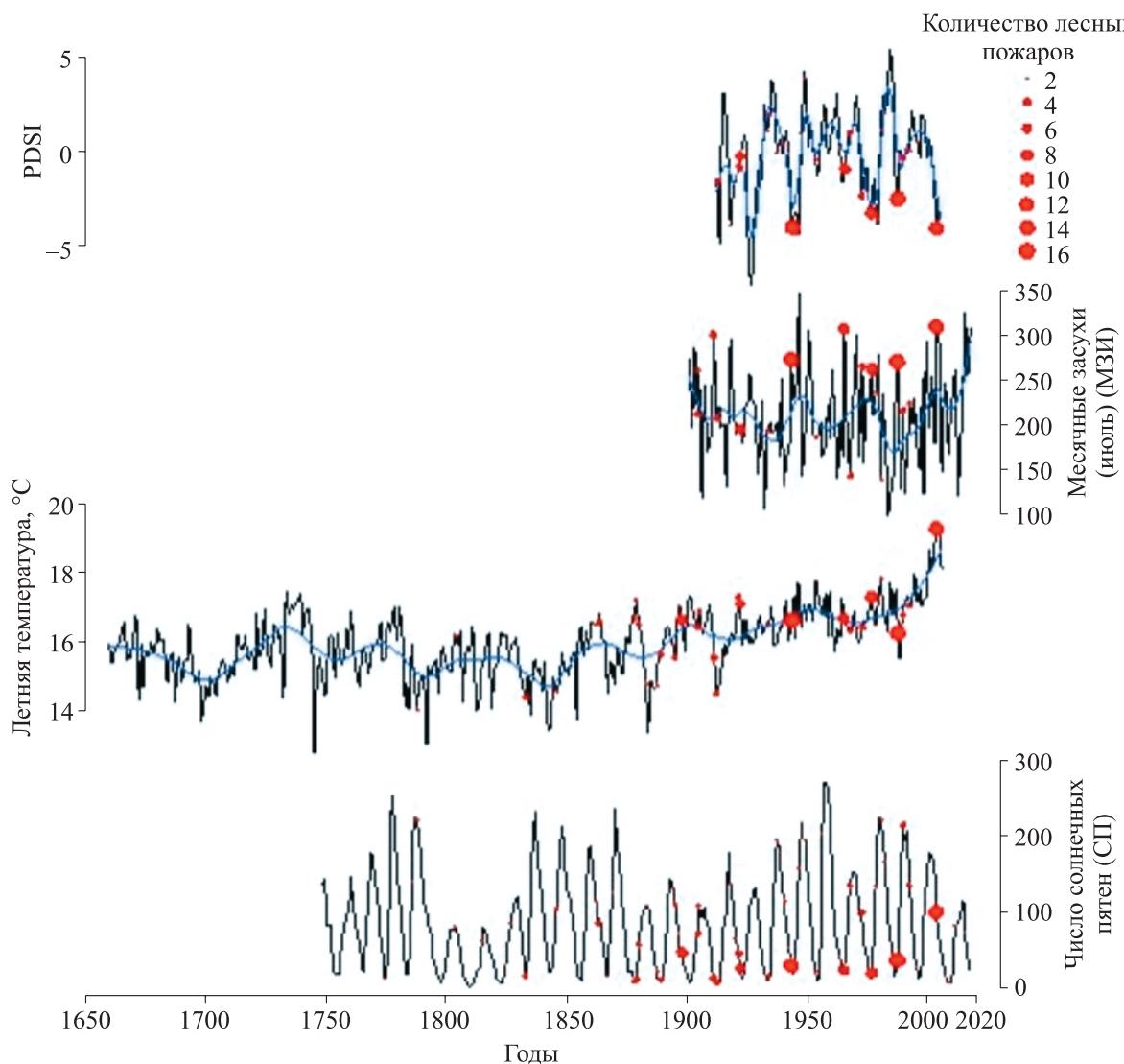


Рис. 4. Сравнение между PDSI, данными о ежемесячной засухе (июль), числами Вольфа и пожарной активностью.

Синяя линия — сглаженный сплайн. Красные точки показывают количество отмеченных лесных пожаров [45].

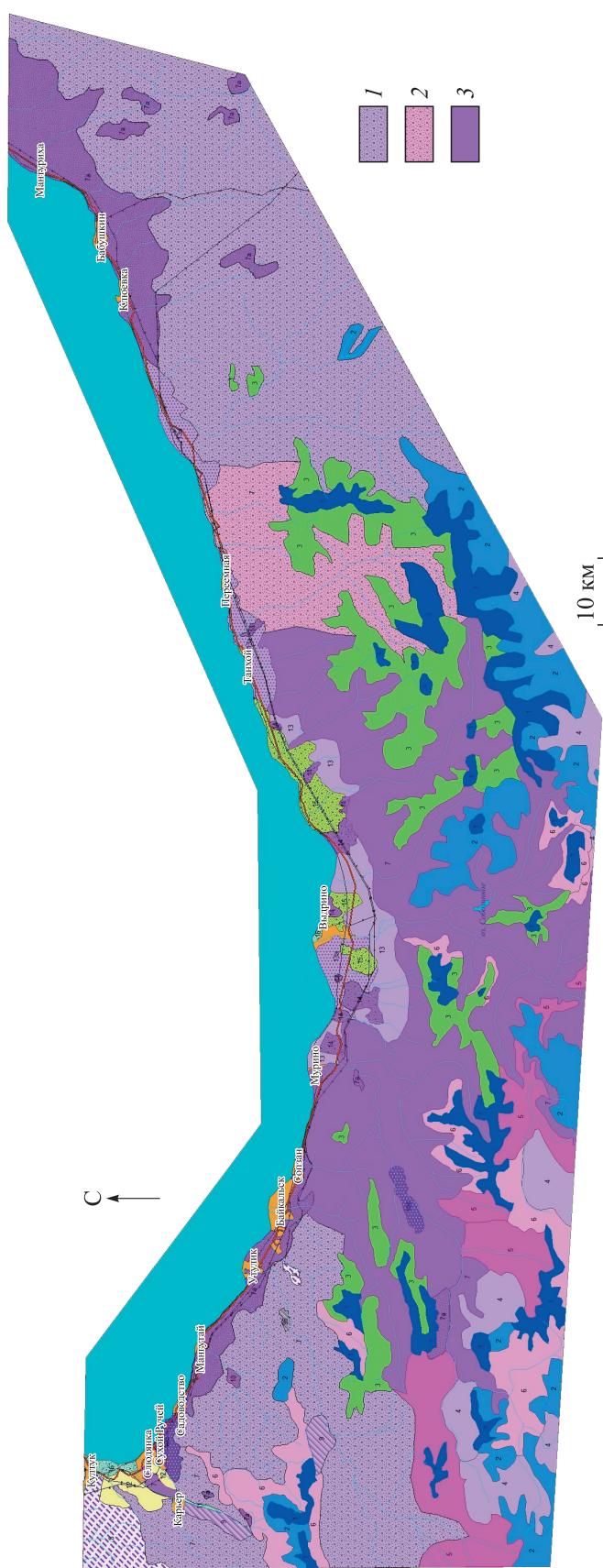


Рис. 5. Карта-схема распространения бактериальной водянки в темнохвойных лесах Хамар-Дабана, по [51].

Леса: 1 — с наибольшим поражением кедровых насаждений, 2 — со средними показателями поражения, 3 — с единичными поражениями.

ты кросс-вейвлет-анализа иллюстрируют синхронность между пожарами и числом солнечных пятен, которая присутствует в 11-летнем солнечном цикле, что указывает на значительную роль солнечной активности в развитии засухи и, следовательно, лесных пожаров. Поскольку 25-й солнечный цикл (2019–2030 гг.) ожидается таким же слабым, как минимум Дальтона, лесные пожары в Забайкалье могут быть интенсивными в развивающемся солнечном цикле.

Оценена секвестрация диоксида углерода хвойными лесами, произрастающими на территории Байкальского природного региона (БПР), в частности на территории входящих в него субъектов Российской Федерации — Иркутской области, Забайкальского края, республик Бурятия и Тыва (Тере-Хольский район), и на части сопредельного государства — Республики Монголия [46]. Хвойные леса Байкальского региона образованы видами лиственниц (*Larix cajanderi* Mayg, *L. gmelinii* (Rupr.) Goep., *L. sibirica*), соснами (*Pinus sibirica* Du Tour. и *P. sylvestris*), елью сибирской (*Pinus obovata* Ledeb.) и пихтой сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.). Годичная секвестрация атмосферного углерода составляет 354,08 млн т, из них 70 % ассимилируется хвойными лесами Иркутской области и Забайкальского края, 30 % — лесами республик Бурятия (19,5 %), Монголия (9,7 %) и Тыва (Тере-Хольский район, 0,8 %). Лиственничными лесами БПР ассимилируется 63,8 % углерода, сосновыми — 17,8, кедровыми — 12,8, еловыми — 3,8 и пихтовыми — 1,8 %. Ежегодная продукция фотосинтетического кислорода составляет 1030 млн т O₂. Объем продуцируемого кислорода в расчете на одного жителя по отдельным административно-государственным субъектам изменяется в широких пределах — от 12 481,98 т в Тере-Хольском районе Республики Тыва до 32,94 т в Республике Монголия — и в среднем по региону достигает 137,05 т O₂.

Значимым экологическим фактором ослабления лесов в регионе являются также распространение и вспышки массового размножения насекомых-ксилофагов и филлофагов. Показано, что

их вредоносность может возрастать до экстремально высокой, когда они способны вызвать изменение структуры насаждений. Разработана оригинальная методика лесопатологического картографирования, на основе которой составлена карта вредоносности насекомых-филлофагов Азиатской России, отражающая дифференциацию территории по уровню эколого-экономических потерь [47]. С применением ГИС-технологий создана серия карт распространения насекомых-ксилофагов, эти сведения необходимы для прогнозирования их массового размножения в Байкальской Сибири. Созданы и зарегистрированы в Роспатенте базы данных по разным группам насекомых, причиняющих ущерб лесному хозяйству региона; базы данных могут рассматриваться как информационно-справочный материал для Центра защиты леса [48].

Совместно с Институтом леса им. В.Н. Сукачева СО РАН и Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН было проведено обследование состояния темнохвойных лесов Южного Прибайкалья, пораженных бактериальной водянкой и подверженных инвазии опасного стволового вредителя пихты — уссурийского полиграфа. Установлено, что на протяжении последних двух десятилетий наблюдается устойчивое ухудшение санитарного состояния темнохвойных лесов Южного Прибайкалья (хр. Хамар-Дабан). Масштабы явления весьма значительны, и счет идет на сотни тысяч гектаров. Для диагностики причин повреждения было проведено первичное обследование ослабленных кедровых лесов, выявленных ранее при анализе спутниковых изображений на территории Иркутской области в Усольском, Слюдянском и Шелеховском лесничествах, а затем на территории Бурятии (Гусиноозерское и Бабушкинское лесничества) в рамках соглашения о сотрудничестве с Центром защиты леса Иркутской области [49].

Симптоматика ряда характерных признаков дала основание для диагностики повреждения темнохвойных древостоев в Иркутской области и Бурятии бактериальными агентами. Микробиологический анализ образцов древесины, отобранных на пробных площадях, проведенный бактериологами отдела диагностики бактериальных болезней ФГБУ Иркутской межобластной ветеринарной лаборатории, позволил выявить наличие бактерий *Pectobacterium carotovorum* (Jones, 1901) Waldee, 1945 [50]. В большей степени этой болезнью повреждаются массивы кедра сибирского.

В среднем, анализируя данные, полученные по постоянным пробным площадям, можно резюмировать: погибшие деревья составляют 30 % древостоя и более; деревья с повреждением кроны от 5 до 10 % — 7–10 %; с повреждением кроны от 11 до 40 % — до 25 %; с повреждением кроны более чем на 40 % — до 40 % древостоя. Это отличает не только кедр, но (хотя в меньшей степени) и пихту. Погибшие деревья затем активно заселяются стволовыми вредителями. Таким образом, можно уверенно говорить о распаде кедрово-пихтовых древостоев в среднегорном поясе Хамар-Дабана на всем его протяжении.

По результатам обследования Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН была составлена карта-схема поражения лесных массивов Южного Прибайкалья бактериальной водянкой и произведена оценка масштабов повреждения [51] (рис. 5).

Наиболее поврежденные леса (сухостоя больше 30 %) занимают площадь 1950 км²; средне-поврежденные (сухостоя до 30 %) — 310 км²; леса с единичными очаговыми повреждениями — 1370 км².

Кроме широкомасштабного повреждения кедровых лесов в среднегорном поясе бактериальной водянкой, в настоящее время возникла угроза тотального повреждения пихтовых массивов Хамар-Дабана опаснейшим инвайдером, вредителем пихты — уссурийским полиграфом, завезенным с Дальнего Востока, который привел к усыханию огромных массивов пихтовых лесов в Центральной Сибири. Заселению вредителем здоровых деревьев способствовало два обстоятельства: затяжной маловодный период на Байкале и предварительное ослабление деревьев бактериальной водянкой. В настоящее время уссурийский полиграф начал широкую экспансию в пихтовые леса Хамар-Дабана, продвинувшись за пять лет от места заселения в горную часть хребта на расстояние более 100 км, охватив практически все пихтовые массивы Хамар-Дабана, что приведет в ближайшие пять лет к массовому усыханию пихтовых лесов, и без того частично ослабленных бактериальной водянкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований ответных реакций компонентов биоразнообразия на всех уровнях его организации на изменение условий среды при воздействии антропогенных факторов необходимы для анализа состояния региональных биологических ресурсов и масштабов их нарушенности. Полученные

данные могут служить информационной базой при определении основных направлений региональной экологической политики, а также важны для оценки современного состояния биоразнообразия Байкальской Сибири, его изменений в условиях пресса антропогенных факторов.

Использование информационных технологий, разработка информационно-аналитических систем и создание баз данных способствуют повышению эффективности мониторинга наземных экосистем Байкальской Сибири и его модернизации.

Развитие двух серьезных угроз, таких как эпидемическая вспышка бактериальной водянки и активно развивающаяся инвазия уссурийского полиграфа, в корне меняет лесопатологическую ситуацию: под угрозой оказывается существование темнохвойных лесов Южного Прибайкалья как экосистемы. Практически все темнохвойные леса Хамар-Дабана в ближайшие пять лет будут существенным образом повреждены, а пожароопасная ситуация станет чрезвычайной. Установлено, что возникновение пожаров сопряжено с засухами, когда количество солнечных пятен уменьшается. Результаты кросс-вейвлет-анализа иллюстрируют синхронность между пожарами и числом солнечных пятен, которая происходит в 11-летнем солнечном цикле, что указывает на значительную роль солнечной активности в развитии засухи и, следовательно, лесных пожаров.

Анализ совокупности данных, полученных при исследованиях экотональной растительности Прибайкалья, в первую очередь почвенно-геоботанических профилей, демонстрирует явление парагенеза растительных сообществ. Парагенез понимается как развитие растительных сообществ, сходных по структурно-динамической организации и не относящихся к зональному типу (поясу) растительности. Растительные сообщества контакта сред — экстразональных (azonальных) образований внутри природных зон — как проявление парагенеза являются естественным процессом развития сопряженных, связанных сходными вещественно-энергетическими потоками с почвами сообществ. При этом матрицей, на которой закладываются, живут и воспроизводятся конкретные биологические виды (сообщества), является геохимическая специализация геологических комплексов, переходящая в почвы. Парагенез одновременно включает в себя и отражает специфику условий среды формирования растительности на фоне динамики и изменчивости климата.

Растительность контакта сред есть ярчайшее проявление парагенеза, обусловливающего разнообразие растительных сообществ, имеющих в первую очередь типологическое и классификационное значение. И это явление может быть основой в изучении экологии видов растений и растительных сообществ, генезиса природной среды в целом. Явление парагенеза характерно для внутrizональных (экстразональных) образований. Оно может быть выражено на локальном (топологическом), региональном (в том числе бассейны крупных водоемов и рек) и континентальном уровнях организации природной среды.

Дальнейшие исследования структуры растительных сообществ контрастных природных условий (а сообщества контакта сред много быстрее реагируют на все изменения природных и антропогенных факторов) других территорий, граничащих с Байкальским регионом, позволят проводить прогнозные построения развития растительности на фоне изменчивости климата во времени и пространстве. Своевременный прогноз вектора развития растительности позволит устанавливать типы и формы оптимального природопользования на конкретных территориях в целом. Как говорил акад. В.Б. Сочава, «с сотворчеством человека и природы» является основой стабильного развития общества [52].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН (122041100058–2, 122041100045–2, 122041100047–6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конспект флоры Иркутской области (сосудистые растения) / под ред. Л.И. Малышева. — Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2008. — 327 с.
2. Макрый Т.В., Казановский С.Г., Бардунов Л.В., Сафонова Т.А., Егорова И.Н., Морозова Т.И., Петров А.Н., Плешанов А.С., Преловская Е.С., Шейфер Е.В. Споровые растения Прибайкальского национального парка. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2008. — 368 с.
3. Бардунов Л.В., Васильев А.Н. Мхи и печеночники лесов Сибири. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2010. — 174 с.

4. Касьянова Л.Н. Экологическая, фитоценотическая и биогеографическая ценность степных растительных сообществ острова Ольхон (озеро Байкал), нуждающихся в сохранении // Успехи современного естествознания. — 2018. — № 11, ч. 2. — С. 90–105.
5. Chernysheva O.A., Bukin Y.S., Kulakova N.V., Mitrenina E.Yu., Murashko V.V., Khadeeva E.R., Erst A.S., Krivenko D.A. How many species of tulips of the subgenus *Orithyia* (*Tulipa*, Liliaceae) are in Southern Siberia? // *Botanica Pacifica*. — 2023. — Vol. 12, N 1. — P. 29–37.
6. Кривенко Д.А., Казановский С.Г., Степанцова Н.В., Верхозина А.В., Алексеенко А.Л. Числа хромосом некоторых видов цветковых растений Байкальской Сибири // *Turczaninowia*. — 2012. — Т. 15, № 1. — С. 98–107.
7. Efimov P.G., Philippov E.G., Krivenko D.A. Allopolyploid speciation in Siberian *Dactylorhiza* (Orchidaceae, *Orchidoideae*) // *Phytotaxa*. — 2016. — Vol. 258, N 2. — P. 101–120.
8. Кривенко Д.А., Мургазалиев Р.А., Бондарюк А.Н., Гусейнова З.А. Числа хромосом эндемичных видов бобовых (Fabaceae) флоры Кавказа из Дагестана // *Turczaninowia*. — 2017. — Т. 20, № 4. — С. 152–158.
9. Krivenko D.A., Vinogradova Yu.K. Chromosome numbers of some Asteraceae taxa of the Old and New World // *Botan. журн.* — 2023. — Т. 108, № 3. — С. 289–295.
10. Mitrenina E.Yu., Alekseeva S.S., Badaeva E.D., Peruzzi L., Artemov G.N., Krivenko D.A., Pinzani L., Aytaç Z., Çeçen O., Baasanmunkh Sh., Choi H.J., Mesterházy A., Tashev A.N., Bancheva S., Lian L., Xiang K., Wang W., Erst A.S. Karyotypes and physical mapping of ribosomal DNA with oligo-probes in some *Eranthis* sect. *Eranthis* (Ranunculaceae) // *Plants*. — 2024. — Vol. 13, N 1. — P. 47. — DOI: 10.3390/plants13010047
11. Верхозина А.В., Федоров Р.К., Казановский С.Г., Шумилов А.С., Кривенко Д.А., Мурашко В.В. Информационно-аналитическая система по фиторазнообразию Байкальской Сибири // Изв. Ирк. ун-та. Сер. Биология. Экология. — 2016. — Т. 9, № 3. — С. 12–29.
12. Erst A.S., Baasanmunkh Sh., Tsegmed Z., Oyundelger Kh., Sharples M.T., Oyunsetseg B., Krivenko D.A., Gureeva I.I., Romanets R.R., Kuznetsov A.A., Kechaykin A.A., Shmakov A.I., Maltseva S.Yu., Erst T.V., Wang W., Gil H.-Y., Choi H.J. Hotspot and conservation gap analysis of endemic vascular plants in the Altai Mountain Country based on a new global conservation assessment // *Global Ecology and Conservation*. — 2023. — Vol. 47. — DOI: 10.1016/j.gecco.2023.e02647
13. Эбель А.Л., Куприянов А.Н., Стрельникова Т.О., Антипович Е.С., Антикова Е.М., Антикова С.В., Буко Т.Е., Верхозина А.В., Доронькин В.М., Ефремов А.Н., Зыкова Е.Ю., Кирина А.О., Ковригина Л.Н., Ламанова Т.Г., Михайлова С.И., Ноженков А.Е., Пликина Н.В., Сильтантьева М.М., Степанов Н.В., Тарасова И.В., Терехина Т.А., Филиппова А.В., Хрусталева И.А., Шауло Д.Н., Шереметова С.А. Черная книга флоры Сибири. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2016. — 440 с.
14. Vinogradova Y., Pergl J., Essl F., Hejda M., Kleunen M. van, Pyšek P. Invasive alien plants of Russia: insights from regional inventories // *Biological Invasions*. — 2018. — Vol. 20. — P. 1931–1943.
15. Kleunen M. van, Pyšek P., Dawson W., Essl F., Kreft H., Pergl J., Weigelt P., Stein A., Dullinger S., König C., Lenzner B., Maurel N., Moser D., Seebens H., Kartesz J., Nishino M., Aleksanyan A., Ansong M., Antonova L.A., Barcelona J.F., Breckle S.W., Brundu G., Cabezas F.J., Cárdenas D., Cárdenas-Toro J., Castaño N., Chacón E., Chatelain C., Conn B., de Sá Dechoum M., Dufour-Dror J.M., Ebel A.L., Figueiredo E., Fragman-Sapir O., Fuentes N., Groom Q.J., Henderson L., Inderjit, Jogan N., Krestov P., Kupriyanov A., Masciadri S., Meerman J., Morozova O., Nickrent D., Nowak A., Patzelt A., Pelsner P.B., Shu W.S., Thomas J., Uludag A., Velayos M., Verkhozina A., Villaseñor J.L., Weber E., Wieringa J.J., Yazlik A., Zeddam A., Zyková E., Winter M. The global naturalized alien flora (GloNAF) database // *Ecology*. — 2018. — Vol. 100, N 1. — DOI: 10.1002/ecy.2542
16. Pouteau R., Thuiller W., Hobohm, Hobohm C., Brunel C., Conn B.J., Dawson W., de Sá Dechoum M., Ebel A.L., Essl F., Fragman-Sapir O., Fristoe T., Jogan N., Kreft H., Lenzner B., Meyer C., Pergl J., Pyšek P., Verkhozina A., Weigelt P., Yang Q., Zyková E., Aćić S., Agrillo E., Attorre F., Bergamini A., Berg Ch., Bergmeier E., Biurrun I., Boch S., Bonari G., Botta-Dukát Z., Bruelheide H., Campos J.A., Čarní A., Casella L., Carranza M.L., Chytrý M., Čušterevska R., De Sanctis M., Dengler J., Dimopoulos P., Ejrnaes R., Ewald J., Fanelli G., Fernández-González F., Gavilán R.G., Gegout J.-C., Haveman R., Isermann M., Jandt U., Jansen F., Jiménez-Alfaro B., Kavgaci A., Khanička L., Knollová I., Kuzemko A., Lebedeva M., Lenoir J., Lysenko T., Marcenò C., Martynenko V., Moeslund J.E., Pätsch R., Pielech R., Rašomavičius V., Ronde I. de, Ruprecht E., Rūsiņa S., Shirokikh P., Šibík J., Šilc U., Stanisci A., Stanić Z., Svenning J.-Ch., Swacha G., Dan Turtoreanu P., Valachovič M., Vassilev K., Yamalov S., Kleunen M. van. Climate and socio-economic factors explain differences between observed and expected naturalization patterns of European plants around the world // *Global Ecology and Biogeography*. — 2021. — Vol. 30, N 7. — P. 1514–1531.
17. Stavitskaya Z., Dudareva L., Rudikovskii A., Garkava-Gustavsson L., Shabanova E., Levchuk A., Rudikovskaya E. Evaluation of the carbohydrate composition of crabapple fruit tissues native to Northern Asia // *Plants*. — 2023. — Vol. 12. — P. 3472.
18. Егорова И.Н., Максимова Е.Н. Наземные водоросли Байкальского региона: библиогр. указатель. — Иркутск: Изд-во Ирк. ун-та, 2018. — 87 с.
19. Егорова И.Н., Судакова Е.А., Максимова Е.Н., Тупикова Г.С. Наземные водоросли гор Южной Сибири и Северной Монголии // *Ботан. журн.* — 2020. — Т. 105, № 2. — С. 107–132.
20. Сизых А.П. Эктоны и парагенез в растительности Байкальского региона: структура, динамика, генезис. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2017. — 340 с.

21. Сизых А.П. Динамика таежных и степных сообществ западного побережья оз. Байкал // География и природ. ресурсы. — 2005. — № 4. — С. 54–60.
22. Sizykh A.P. Plant communities environmental interface as a problem of ecology and biogeography // Biology Bulletin. — 2007. — Vol. 34, N 3. — P. 292–296.
23. Sizykh A.P. Models of Taiga-Steppe Communities on the Western Coast of Lake Baikal // Russian Journal of Ecology. — 2007. — N 4. — P. 234–237.
24. Сизых А.П. Пространственная изменчивость растительных сообществ зоны контакта «лес–степь» по аэрокосмическим снимкам разных лет съемки // Исследования Земли из космоса. — 2007. — № 3. — С. 255–258.
25. Сизых А.П., Кузьмин В.А., Воронин В.И. Биогеоценотические аспекты формирования таежно-степных сообществ западного побережья озера Байкал // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2008. — № 1. — С. 107–115.
26. Сизых А.П. Динамика таежно-степных сообществ западного побережья озера Байкал // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2008. — № 6. — С. 86–93.
27. Sizykh A.P., Voronin V.I. Spatial variability of vegetation of the Baikal region under changing climate // Geography, Environment, Sustainability. — 2009. — N 1 (2). — P. 73–80.
28. Sizykh A.P., Voronin V.I. Soil-geobotanical profiling in studies on communities of the forest-extrazonal steppe function and zonal forest-steppe (the Baikal region) // Russian Journ. of Ecology. — 2013. — Vol. 44, N 1. — P. 93–99.
29. Сизых А.П. Почвенно-геоботаническое профилирование растительных сообществ контакта сред. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. — 129 с.
30. Сизых А.П. Экотоны и парагенез в растительности Байкальского региона: структура, динамика, генезис. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2017. — 340 с.
31. Сизых А.П., Гриценюк А.П., Шеховцов А.И., Воронин В.И. Структура и тенденции формирования лесов юго-западного побережья оз. Байкал // География и природ. ресурсы. — 2019. — № 5 (спец. выпуск). — С. 33–37.
32. Сизых А.П., Белозерцева И.А., Воробьёва И.Б., Власова Н.В., Шеховцов А.И. Пространственная организация и экологическое состояние ландшафтов в бассейне р. Рель // География и природ. ресурсы. — 2020. — № 4. — С. 115–127.
33. Voronin V.I., Sizykh A.P., Oskolkov V.A. Soil-geobotanical profiling as the indication method for vegetation development in the Baikal region // Geography and Natural Resources. — 2022. — Vol. 43, N 3. — P. 245–252.
34. Voronin V.I., Sizykh A.P., Oskolkov V.A. Structural and dynamic organization of forests of the basin of Lake Baikal // Geography and Natural Resources. — 2023. — Vol. 44, N 1. — P. 58–66.
35. Sizykh A.P., Voronin V.I., Oskolkov V.A., Gritsenko A.P. Reforestation in postagricultural areas of Western Transbaikalia // Geography and Natural Resources. — 2023. — Vol. 44, N 4. — P. 70–76.
36. Михайлова Т.А., Калугина О.В., Шергина О.В. Мониторинг техногенного загрязнения и состояния сосновых лесов на примере Иркутской области // Лесоведение. — 2020. — № 3. — С. 265–273.
37. Kalugina O.V., Shergina O.V., Mikhailova T.A. Ecological condition of natural forests located within the territory of a large industrial center, Eastern Siberia, Russia // Environmental Science and Pollution Research. — 2020. — Vol. 27. — P. 22400–22413.
38. Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. Biochemical Adaptation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) // Contemporary Problems of Ecology. — 2018. — Vol. 11, N 1. — P. 79–88.
39. Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Суворова Г.Г., Игнатьева О.В., Шергина О.В. Трансформация ассимиляции углерода в древостоях, ослабленных промышленными эмиссиями // Сиб. экол. журн. — 2005. — № 4. — С. 745–751.
40. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V. Biogeochemical changes in forest ecosystems polluted by industrial emissions, East Siberia, Russia // Forestry Ideas. — 2019. — Vol. 25, N 2 (58). — P. 251–263.
41. Shergina O.V., Mikhailova T.A., Kalugina O.V. Assessment of soil ecological condition under industrial air pollution in Baikal region // Russian Journal of General Chemistry. — 2018. — Vol. 88, N 13. — P. 2854–2861.
42. Takahashi M., Feng Z., Mikhailova T.A., Kalugina O.V., Shergina O.V., Afanasieva L.V., Heng R.K.J., Majid N.M.A., Sase H. Air pollution monitoring and tree and forest decline in East Asia: A review // Science of the Total Environment. — 2020. — Vol. 742. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140288
43. Шергина О.В., Михайлова Т.А. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2007. — 200 с.
44. Shergina O.V., Mikhailova T.A., Kalugina O.V., Proidakova O.A. Natural recovery of soil and vegetation covers on industrial dumps // Geography and Natural Resources. — 2015. — Vol. 36, N 2. — P. 146–153.
45. Wang Z., Huang J.-G., Ryzhkova N., Li J., Kryshen A., Voronin V., Li R., Bergeron Y., Drobyshev I. 352 years long fire history of a Siberian boreal forest and its primary driving factor // Global and Planetary Change. — 2021. — Vol. 207. — DOI: 10.1016/j.gloplacha.2021.103653
46. Суворова Г.Г. Фотосинтез хвойных деревьев в условиях Сибири. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009. — 195 с.
47. Эпова В.И., Плещанов А.С. Зоны вредоносности насекомых-филлофагов Азиатской России. — Новосибирск: Наука, 1995. — 147 с.
48. Antonov I.A. Regional information and analytical system on insect biodiversity of the Baikal region // Information Technologies in the Research of Biodiversity. The proceedings of the International Conference, Irkutsk, Russia (11–14 September, 2018, Irkutsk). — Cham: Springer, 2019. — P. 8–13. — (Series: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences).

49. **Морозова Т.И., Воронин В.И.** Многолетний лесопатологический мониторинг в Байкальском регионе и выявление причин массовых повреждений лесов. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2019. — 126 с.
50. **Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100)** / Ред. Ю.Ю. Дгебуадзе, В.Г. Петросян, Л.А. Хляп. — М.: Т-во науч. изд. КМК, 2018. — 687 с.
51. **Воронин В.И., Софронов А.П., Морозова Т.И., Осколков В.А., Суховольский В.Г., Ковалёв А.В.** Ландшафтная приуроченность бактериальных болезней темнохвойных лесов хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // Геогр. и природ. ресурсы. — 2019. — № 4. — С. 56–65.
52. **Сочава В.Б.** Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 320 с.

Поступила в редакцию 03.04.2024

После доработки 25.04.2024

Принята к публикации 07.05.2024
