

ISSN 2782-3237

Экологический мониторинг и моделирование экосистем

Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling

Том XXXIV № 1-2



Москва 2023

Federal State Budgetary Institution
«Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology»
(FSBI «IGCE»)

**ECOLOGICAL MONITORING
AND ECOSYSTEM MODELLING**

Volume XXXIV
№ 1-2

Moscow 2023

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт глобального климата и экологии
имени академика Ю.А.Израэля»
(ФГБУ «ИГКЭ»)

Том XXXIV № 1-2 2022 год

Научный редактор: С.Б. Сулова

Выпускающий редактор: В.А. Гинзбург

Технические редакторы: И.М. Брускина, Л.В. Кудрявцева

Верстка: Л.А. Прохорова

Фото на обложке: Б.А. Кухта

Свидетельство о регистрации СМИ: от 15.03.2021 г.
Эл № ФС 77-80601

Москва 2023

Федеральное государственное бюджетное учреждение
"Институт глобального климата и экологии
имени академика Ю.А.Израэля"
(ФГБУ "ИГКЭ")

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ**

Том XXXIV

№ 1-2

Москва 2023

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

Том XXXIV № 1-2 2023 г.

Научный журнал, публикующий статьи о методах и результатах мониторинга загрязнения и состояния окружающей среды, по сопряженным вопросам моделирования. Публикуются также статьи о системах мониторинга и их функционировании, информационные материалы. Издание «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем» выпускается с 1978 г. года. Для экологов, климатологов и специалистов в области охраны окружающей среды.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: А.А. Романовская (главный редактор), А.Е. Кухта (зам. главного редактора), В.А. Брынцев, В.А. Гинзбург, Ю.Б. Глазунов, С.А. Громов, Г.Э. Инсаров, А.А. Минин, Р.И. Назырова, А.В. Ольчев, С.Б. Суслова (научный редактор), И.О. Тихонова, А.А. Тишков, А.А. Трунов (ответственный секретарь), Л. Лундин, Шуйская Е.А., М. Вана.

Все статьи рецензируются.

Адрес для первичного представления материалов для публикации: РФ, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, ИГКЭ, Трунову А.А.; e-mail: pemme@inbox.ru. Правила оформления рукописей и их представления для публикации – см. <http://www.igce.ru/>.

© Оформление издания: ФГБУ «ИГКЭ», 2023

ECOLOGICAL MONITORING AND ECOSYSTEM MODELLING

Volume XXXIV № 1-2 2023

A scientific journal publishing papers on methodologies and results of monitoring of pollution and state of the environment, as well as on associated modelling issues. Papers on monitoring systems and their functioning, and information materials are also invited. Published since 1978. The journal may be of interest for ecologists, climate scientists and experts in protection of the environment.

EDITORIAL BOARD: A.A. Romanovskaya (editor-in-chief), A.E. Kukhta (deputy editor-in-chief), V.A. Bryntsev, V.A. Ginzburg, Y.B. Glazunov, S.A. Gromov, G.E. Insarov, A.A. Minin, R.I. Nazyrova, A.V. Olchev, S.B. Suslova (science editor), I.O. Tikhonova, A.A. Tishkov, A.A. Trunov (assistant editor), L. Lundin, E.A. Shuyskaya, M. Vana.

All papers are subject for peer-reviewing.

Primary submission of manuscripts: Trunov A.A., IGCE, Glebovskaya str, 20B, 107258 Moscow, Russian Federation; e-mail: pemme@inbox.ru. Rules for the preparation and submission of manuscripts are available at <http://www.igce.ru/>.

© Design: FSBI “IGCE” 2023

СОДЕРЖАНИЕ

АКТУАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Эдельгериев Р.С.-Х., Романовская А.А.

Комментарии к итогам 27-й Конференции сторон РКИК ООН (КС27)
(6-20 ноября 2022 г., Египет, г. Шарм-эш-Шейх).....5

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

Юбилей Эсфири Яковлевны Раньковой.....10

Памяти Михаила Дмитриевича Корзухина (1941-2023).....16

ИССЛЕДОВАНИЯ

Лапина Е.Е., Кудряшова В.В., Лапина Л.Э.

Изменения химического состава грунтовых вод вокруг
Иваньковского водохранилища за 20 лет.....18

Солдатов М.С., Минин А.А., Коренной Ф.М.

Динамика сроков весеннего прилета скворца обыкновенного
на Европейскую территорию России.....38

Янцер О.В., Лаптев Н.А.

Влияние климатических изменений на сроки начала цветения
черемухи обыкновенной на Урале в XX–XXI веке.....53

Шанин В.Н., Фролов П.В., Коротков В.Н.

Предварительная валидация лесоклиматических проектов
с использованием прогнозного имитационного моделирования.....66.

Максимова, О.В., Аронов, И.З., Еремеева, Н.В .

Анализ практики достижения этнокохозяйственного консенсуса
на основе моделирования переговорного процесса.....92

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ МОНИТОРИНГА

Спасовский Ю.Н.

Фенологический мониторинг фитоценозов основных высотных поясов
в Кавказском заповеднике с использованием метода В.А. Батманова.....110

ДИСКУССИЯ

Румянцев Д.Е., Воробьева Н.С.

Влияние солнечной активности на рост осины в условиях
Мордовского заповедника.....128

СООБЩЕНИЯ

Захаров В.П.

Как самые обычные люди помогают науке.....143

CONTENTS

ACTUAL MATERIAL

Edelgeriev R.S.-Kh., Romanovskaya A.A.

Comments on the outcomes of the 27th UNFCCC Conference of the Parties (COP27) (November 6-20, 2022, Egypt, Sharm el-Sheikh).....5

EVENTS AND COMMEMORATIVE DATES

Anniversary of E.Ya. Rankova.....10

In memory of the Mikhail D. Korzukhin (1941-2023).....16

STUDIES

Lapina E.E., Kudryashova V.V., Lapina L.E.

Changes in the chemical composition of groundwater about the Ivankovo reservoir over 20 years.....18

Soldatov M.C., Minin A.A., Korennoy F.M.

Dynamics of the timing of the spring arrival of the common starling on the European territory of Russia.....38

Yantser O.V., Laptev N.A.

The influence of climatic chances on the timing of the beginning changes of flowering of common cherry in the Urals in the XX-XXI century.....53

Shanin V.N., Frolov P.V., Korotkov V.N.

Preliminary validation of forest climatic projects with predictive simulation modelling.....66

Maksimova O.V., Aronov I.Z., Ereemeeva N.V.

Analysis of the practice of achieving an ethno-economic consensus based on the modeling of the negotiation process.....92

MONITORING

Spasovsky Yu. N.

Phenological and monitoring of plant communities of the main high-altitude zones in the Caucasian Reserve method of V.A. Batmanov.....110

DISCUSSION

Rumyantsev D.E., Vorobieva N.S.

Influence of solar activity on aspen growth in the conditions of the mordovian nature reserve.....128

MESSAGES

Zakharov V.P.

How ordinary people help science.....143

АКТУАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Комментарии к итогам 27-й конференции сторон РКИК ООН (КС27)

(6-20 ноября 2022 г., Египет, г. Шарм-эш-Шейх)

*Р.С.-Х. Эдельгериев¹⁾, А.А. Романовская²⁾**

¹⁾Администрация Президента РФ,
Россия, 103132, Москва, Старая площадь, 6 стр.1

²⁾Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258 Москва, ул. Глебовская, 20Б

*Адрес для переписки: an_roman@igce.ru

КС27 изначально не планировалась как значимое политическое мероприятие, основные цели странами ставились на подведении промежуточных итогов уже идущих программ и направлений и формулировке следующих шагов. Конференция обозначалась как «конференция по реализации, осуществлению» (implementation). Эти задачи на конференции выполнены: работа под РКИК ООН, Киотским протоколом и Парижским соглашением продолжится в полном объеме.

Из политических аспектов просматривались три: увеличение объемов климатического финансирования, в том числе на задачи по адаптации; подтверждение\усиление амбиций по сокращению выбросов парниковых газов в продолжение Климатического пакта Глазго 26КС; а также выделение направления потерей и ущерба от изменения климата в отдельный трек в дополнение к митигации и адаптации, прежде всего в отношении финансирования. Представляется, что из перечисленных трех задач выполнена только третья, но и то, лишь на декларативном уровне.

Несмотря на множество финансовых пунктов повестки дня и тяжелых переговоров на сессии по ним, принятые решения лишь обозначают новый раунд финансовых семинаров, экспертных диалогов, сбора мнений Сторон, подготовку компиляций и технических отчетов Секретариатом. основополагающие формулировки с количественными показателями не изменены с момента принятия Парижского соглашения. Недостижение Канкунских договоренностей о предоставлении 100 млрд долларов в год развивающимся странам в период до 2020 года (согласно отчету ОЭСР в 2020 г. мобилизовано в сумме 83.3 млрд долларов) значительно осложнило финансовые переговоры на КС27, которые в последние сутки конференции заблокировали работу по остальным трекам. Доверие к обещаниям и требованиям развитых стран в значительной степени оказалось подорвано. Напомним, что договоренности

по финансам в Глазго предусматривали необходимость выполнения данного финансового обязательства.

На этом фоне формулировки по увеличению сокращения выбросов и фокусе на цели в удержании потепления в пределах 1.5°C, согласованные в Глазго, также были в основном решении КС27 сильно размыты. Двигаться в сторону усиления амбиций без должного финансирования развивающиеся страны объективно не могут. И утверждать, что страны в Шарм-эш-Шейхе подтвердили свою приверженность целям в 1.5 градуса, не следует: напротив, Шарм-эш-Шейх показал, что большинство стран («слишком много Сторон», как заметил на заключительном пленарном заседании представитель ЕС) не готовы кардинально менять планы по митигации. Практически все формулировки в соответствующем разделе главных решений по РКИК ООН и Парижскому соглашению о необходимости дальнейшего усиления поставленных целей и увеличения амбиций сопровождаются словами «с учетом различных национальных условий», что, по сути, делает их необязательными для исполнения. Нецелесообразность продавливания нереальных целей по борьбе с изменением климата отмечалась и ранее.

Одним из прорывных достижений Глазго в 2021 г. (<https://www.kommer-sant.ru/doc/5060885>) стало впервые согласование секторальной цели по поэтапному сокращению угольной энергетики, не оснащенной системами улавливания и хранения углерода, и поэтапного отказа от неэффективных субсидий на ископаемое топливо. Соответствующие формулировки повторены и в решении Шарм-эш-Шейха, но не только не развиты далее, но девальвируются следующими параграфами по важности сохранения и восстановления природы и экосистем и необходимости сокращать негативные последствия ответных мер развитых стран в борьбе с изменением климата (где в 2022 г. активно проводилось обсуждение трансграничных мер регулирования, вводимых некоторыми странами в одностороннем порядке). Во время переговоров упор многими странами вновь делался на национально-определяемом подходе к достижению целей Парижского соглашения, что, собственно, и заложено в его тексте.

Примечательный факт произошел во время обсуждения проекта главного решения КС27, где делегация Индии предложила формулировку по поэтапному сокращению использования всех ископаемых топлив (гениальный ход на переговорах!). Против этого предложения выступили и США, и ЕС, в том числе, аргументировав, что необходимо бороться именно и отдельно со сжиганием угля. Так что и наиболее развитые страны демонстрируют неготовность к кардинальным действиям по сокращению выбросов, выходящим за пределы их национальных экономических интересов.

Таким образом, на КС27 проходило «восстановление баланса» в интересах и возможностях стран в борьбе с изменением климата, которое было нарушено в результате колоссального давления председательства в Глазго (<http://www.igce.ru/2021/11/мнение-об-итогах-26-й-конференции-сторон/>), а также возврат к формулировкам и принципам, согласованным в Париже – по нацио-

нальному определению секторов, мер и скоростей сокращения выбросов, движения к выполнению общей цели.

К сожалению, малое внимание было уделено на переговорах и совсем не нашел отражения в тексте главного решения КС27 тот факт, что впервые анализ определенных на национальном уровне вкладов (ОНУВ) стран показал, что пик выбросов может быть пройден до 2030 г. и к 2030 году общие выбросы парниковых газов окажутся ниже на 0.3% уровня 2019 г. (FCCC/PA/СМА/2022/4). А ведь все предыдущие отчеты демонстрировали, что выбросы парниковых газов будут продолжать рост и после 2030 г. С этим фактом следовало бы страны поздравить в финальном решении, а не только отмечать «с серьезной озабоченностью», что это не соответствует требуемому сокращению на 43% от 2019 г. – по самому жесткому сценарию без превышения или с минимальным превышением потепления в 1.5°C согласно Шестому оценочному докладу МГЭИК (2022). Следует отметить, что несовпадение траектории глобальных выбросов с этим сценарием совсем не означает, что цель Парижского соглашения не будет выполнена: обращаем внимание, что Парижское соглашение устанавливает цель на конец XXI века и ничего не упоминает о невозможности временного превышения целевых значений потепления, которое избежать вряд ли удастся.

Решение о создании отдельного фонда для компенсации текущих потерей и ущерба от изменения климата и затрат на восстановление территорий после таких событий стало той компромиссной точкой переговоров, которая позволила завершить КС27 успешно, с принятием полного пакета документов. Однако кроме громких заявлений пока говорить о практическом прогрессе в этом направлении также преждевременно: не установлено ни кому платить (в тексте содержится туманная формулировка «развивающиеся страны, которые особенно уязвимы к негативным последствиям изменения климата»), ни за что платить (нет указания, кто и как будет оценивать атрибуцию отдельных явлений к последствиям изменения климата, а также взаимосвязанный ущерб, особенно косвенный), как и не ясно откуда будут поступать эти новые и дополнительные ресурсы. Часть этих вопросов поручена к разработке Переходному комитету.

Интенсивная и конструктивная работа была проведена на переговорном треке по статье 6 Парижского соглашения – рыночные и нерыночные механизмы – в отношении технических деталей функционирования реестров, выполнению отчислений, подготовке отчетности по статье 6 и т.д. Представляется разумным как можно скорее определить в Российской Федерации ответственный национальный орган по взаимодействию по статье 6 и подготовку соответствующей отчетности с тем, чтобы он также принимал полноценное участие в этих переговорах.

Наиболее интересные и важные для нас вопросы в Глазго были отнесены к компетенции Надзорного органа по статье 6.4 (такие как, методики для проектной деятельности, продолжительности кредитных периодов по конкретным видам проектов, подходы к реализации проектов по поглощению и т.д.).

Следует отметить, что начал работу этот орган с опозданием только во второй половине 2022 г., порученные работы в полном объеме выполнить к КС27 не успел, а то, что сделал, было выполнено с нарушением мандата: члены Надзорного органа принялись править согласованные в Глазго формулировки по базовым линиям климатических проектов. В нарушение всех процедур пришлось корректировать эти решения уже после окончания заседания Надзорного органа во время КС27. Текст рекомендаций по проектам по поглощению парниковых газов отправлен назад в Надзорный орган на доработку в течение 2023 г. с поручениями от стран уделить больше внимания возможным негативным эффектам таких проектов и минимизации их рисков. Российской Федерации целесообразно самостоятельно проработать эти вопросы и быть готовыми отстаивать свои интересы на следующей КС.

Радует, что направление по природно-ориентированным решениям на переговорах набирает объем и детализацию. Главное решение КС27 отмечает важность таких действий не только традиционно в преамбуле, но и в разделе по митигации. Дополнительно в решении выделены собственные разделы по отдельным экосистемам: океаны и леса. На следующей КС Российской Федерации придется сосредоточиться на переговорной работе в этом направлении с тем, чтобы специфика российских экосистем была полностью учтена в рамках природно-ориентированных решений, в том числе, болотных экосистем и бореальных лесов.

Отдельный форум Постоянного комитета по финансам был посвящен природно-ориентированным решениям и источникам их финансирования. Рекомендуем к изучению их итоговый документ (<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Forum%20synthesis%20report.pdf>), особенно в отношении того простого факта, что углеродный рынок не может являться единственным или даже основным источником финансирования таких мероприятий. Равно как и следует различать действия в области природно-ориентированных решений и лесоклиматические проекты, которые у нас, видимо, пока путаются (разрекламированного (<https://www.interfax.ru/interview/873727>) у нас в стране пункта «о признании лесоклиматических проектов», который якобы включен в главное решение КС27, найти в тексте нам не удалось).

На КС27 достигнуты согласования по отчетности в рамках РКИК ООН и Парижского соглашения для гарантии сопоставимости отчетности и отсутствия двойного учета. Достигнуты все договоренности, позволяющие странам перейти к 2024 г. на новый формат под Парижским соглашением.

За огромным числом разных направлений и инициатив переговорного процесса легко потерять смысл всей этой работы. Именно в Шарм-эш-Шейхе прошли переговоры по Второму периодическому обзору долгосрочной глобальной цели в рамках Конвенции и общего прогресса в ее достижении. Напомним, что цель Конвенции сформулирована как «...стабилизация концентраций парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему...». Пределы «температурной» цели Парижского соглашения по «удержанию прироста глобальной средней температуры намного ниже 2°C сверх доиндустри-

альных уровней и приложения усилий в целях ограничения роста температуры до 1.5°C» ни в одном отчете МГЭИК не признавались «опасным антропогенным воздействием на климатическую систему». Данные температурные пределы были согласованы на переговорах и не имеют четкого научного обоснования. К сожалению, в решении Шарм-эш-Шейха этот важный аспект не нашел отражения. Вероятно, можно было бы пригласить МГЭИК провести аналитическую работу по оценке уровня опасного воздействия на климатическую систему и его количественных показателей.

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

Юбилей Эсфири Яковлевны Раньковой



Замечательному ученому, главному научному сотруднику ИГКЭ, доктору физико-математических наук, Заслуженному метеорологу Российской Федерации Эсфири Яковлевне Раньковой, 21 ноября 2022 г. исполнилось 85 лет.

Эсфирь Яковлевна родилась в Самарканде (Узбекская ССР). Здесь она окончила среднюю школу, а потом поступила на математический факультет Ленинградского государственного педагогического института имени Герцена. Окончив его и проработав по распределению учителем математики, она вернулась в Узбекистан, но уже в Ташкент, поступив на работу в Средне-Азиатский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, где и началась ее многолетняя научная работа в области метеорологии и климатологии. В совместной работе с выдающимся отечественным климатологом Георгием Вадимовичем Груза (под руководством которого она начинала научную деятельность и защитила кандидатскую диссертацию) Эсфирь Яковлевна во многом определила пути развития современной отечественной компьютерной климатологии. Здесь в кратком обзоре приведены по необходимости

(всего ею опубликовано более 120 работ, в том числе 6 монографий) лишь некоторые из основных, обобщающих работ, характеризующих направления и этапы научной деятельности Эсфири Яковлевны.

С самого начала творческого пути Эсфирь Яковлевну привлекал круг вопросов, связанных с вероятностным метеорологическим прогнозом (Груза, Ранькова, 1968, 1983), и в особенности – эмпирико-статистического прогнозом с использованием групп аналогов к текущему процессу (Груза, Ранькова, 1981): многолетняя работа, завершившаяся созданием прогностической схемы долгосрочного прогноза ГРАН (групповые аналоги) (Груза, Ранькова и др., 1989). Впоследствии эта идеология и наработанные средства были использованы для сценарного прогноза изменений температуры воздуха при изменении концентрации парниковых газов (Груза, Ранькова, 1999).

Наряду с прогнозом (и также в помощь ему) Эсфирь Яковлевна активно занималась исследованиями статистической структуры метеорологических полей и процессов (Груза, Милохова, Ранькова, 1971; Груза, Ранькова, Семенов, 1990; Груза, Ранькова, Семенов, 1993; Груза, Ранькова, 1996). В процессе этих работ появились многочисленные тома серии «Структура и изменчивость наблюдаемого климата», первым из которых стал том, посвященный температуре воздуха у поверхности Земли (Груза, Ранькова, 1980).

Все эти работы были бы невозможны без наличия специализированных баз данных для исследований климата: основные принципы их построения были сформулированы в (Груза, Ранькова, 1974), а в середине 1980-х сформирован банк данных «Синоптическая метеорология (Аристова, Груза, Качурин, Ранькова, 1987).



Обнинск, 1977 год, Конференция по применению статистических методов в метеорологии.
Слева направо в переднем ряду: Г.В. Груза, М.И. Юдин, К.В. Кондратович, Э.Я. Ранькова,
А.В. Мещерская, Н.В. Кобышева, Н.А. Багров

К концу 1980-х на передний план выходят задачи, связанные с изменением климата, в том числе – построение системы слежения за изменениями состояния климатической системы (мониторинг климата). Соответствующие определения и требования к этой системе сформулированы в статье (Груза, Ранькова, 1989). С этого времени Эсфирь Яковлевна руководит практической реализацией системы мониторинга: первая такая система была основана на данных субъективных анализов метеорологических полей Северного полушария (Мониторинг ..., 1992). Однако, такая историческая база страдает неоднородностью рядов анализов, выполненных разными синоптиками, и невозможностью оценить неопределенность региональных обобщений. Поэтому инициируется работа по созданию системы, основанной непосредственно на данных станционных метеорологических наблюдений. Первый бюллетень мониторинга климата России (температура воздуха и атмосферные осадки), основанный на новой методике, был подготовлен в 1997 г., в последующие годы технологии мониторинга совершенствовались, и в 2012 г. «Методика мониторинга приземного климата РФ» (Груза, Ранькова, Бардин и др., 2012) была утверждена ЦМКП Росгидромета. В 2013 г. по инициативе Г.В. Груза и под руководством Эсфири Яковлевны была начата разработка методики глобального мониторинга температуры воздуха у поверхности суши Земли (Груза, Ранькова, Рочева, 2017).

На основе результатов мониторинга получены многочисленные результаты об изменениях и изменчивости приземного климата (Ранькова, Груза, 1998; Груза, Ранькова, 1999; Груза, Ранькова, 2003; Gruza, Rankova, 2004; Израэль, Груза, Ранькова, 2009; Груза, Ранькова, 2012; Бардин, Ранькова, Платова и др., 2020). Эсфирь Яковлевна ведет в настоящее время огромную теоретическую и практическую работу по систематической оценке состояния климатической системы Земли и тенденций ее изменения. Она автор разделов «Температура воздуха» и «Атмосферные осадки» в главе «Наблюдаемые изменения» всех трех Оценочных докладах об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. С 2015 г. Эсфирь Яковлевна с сотрудниками ежегодно публикует обзор состояния глобального климата (температура приземного воздуха) на страницах издаваемого ИГКЭ журнала «Фундаментальная и прикладная климатология».

Помимо своей неутомимой научной деятельности, Эсфирь Яковлевна хорошо известна среди коллег своим энтузиазмом в организации отдельных праздников. Она – душа застолий, знающая и умеющая рассказать с искренним юмором массу жизненных историй, прекрасный кулинар и кондитер: плодами ее творчества и на этом поприще наслаждались не только сотрудники отдела, но и многочисленные гости отдела из разных уголков страны.

Сотрудники, весь коллектив ИГКЭ сердечно поздравляют Эсфирь Яковлевну Ранькову с юбилеем и желают ей крепкого здоровья, новых успехов в науке и оптимизма на долгие годы жизни!



Э.Я. Ранькова на юбилее Г.В. Груза с именинником и М.Ю. Бардиным

Список основных публикаций Э.Я. Раньковой

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1968) Численный эксперимент по вероятностному прогнозу типа температурного режима в течение пяти дней, *Труды САНИГМИ*, вып. 40(55), с. 3-9.

Груза, Г.В., Милохова, Э.Н., Ранькова, Э.Я. (1971) О машинной типизации полей некоторых интегральных характеристик циркуляции атмосферы над Северным полушарием, *Труды САНИГМИ*, вып. 58(73), с. 20-32.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1974) Организация метеорологических архивов для статистического анализа на ЭВМ, *Труды САНИГМИ*, вып. II (92), с.143-162.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1980) *Структура и изменчивость наблюдаемого климата. Температура воздуха над Северным полушарием*, Л., Гидрометеоиздат, 72 с.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1981) Об использовании аналогов для оценки предсказуемости и долгосрочного прогноза полей среднемесячной температуры воздуха, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 13-22.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1983) *Вероятностные метеорологические прогнозы*, Л., Гидрометеоиздат, 271 с.

-
- Аристова, Л.Н., Груза, Г.В., Ефремова, Н.М., Качурина, Л.Р., Ранькова, Э.Я. (1987) *Банк данных «Синоптическая метеорология»*, М., Гидрометеиздат, 170 с.
- Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1989) *Мониторинг и вероятностный прогноз короткопериодных колебаний климата, 60 лет Центру гидрометеорологических прогнозов*, Л., Гидрометеиздат, с. 148-170.
- Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Семенюк, Е.А., Бардин, М.Ю., Муравьев, А.В., Нестерова, Г.А., Савелова, О.Ф., Хамидуллина, А.Б. (1989) Схема вероятностного адаптивного метеорологического прогноза (групповые аналоги) с оптимизацией состава предикторов, *Труды Гидрометцентра СССР*, вып. 306, с. 3-54.
- Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Семенюк, Е.А. (1990) Связь индексов атмосферной циркуляции с приземной температурой воздуха Северного полушария, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 21-28.
- Мониторинг и вероятностный прогноз климата* (1992) СПб., Гидрометеиздат, 128 с.
- Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Семенюк, Е.А. (1993) Пространственные корреляции в приземных метеорологических полях Северного полушария, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 22-27.
- Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1996) О типизации форм циркуляции в умеренных широтах Северного полушария по положению осевой изогипсы высотной фронтальной зоны на поверхности 500 гПа, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 5-13.
- Ранькова, Э.Я., Груза, Г.В. (1998) Индикаторы изменений климата России, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 5-18.
- Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1999) Оценка климатического отклика на изменение концентрации тепличных газов по данным наблюдений за приземной температурой воздуха на территории России, *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*, т. 35, № 6, с. 742-749.
- Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (2003) Колебания и изменения климата на территории России, *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*, т. 39, № 2, с. 1-20.
- Gruza, G., Rankova, E. (2004) Detection of changes in climate state, climate variability and climate extremity. *Proceedings of the World Climate Change Conference held in Moscow, Russia, 29 Sept.- 3 Oct. 2003*, 90-98, 122-124.
- Израэль, Ю.А., Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (2009) Предел предсказуемости и стратегический прогноз изменений климата, *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, М., ИГКЭ, т. XXII, с. 7-26.
- Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (2012) *Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России*, Изд. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 198 с., ISBN 978-5-901579-35-0.
-

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Бардин, М.Ю., Рочева, Э.В., Самохина, О.Ф., Платова, Т.В., Соколов, Ю.Ю. (2012) *Методика мониторинга климата на территории РФ: температура приземного воздуха, атмосферные осадки*, URL: <http://method.meteorf.ru/methods/long/monitor/monitor.html>.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Рочева, Э.В. (2017) Методика «Мониторинг изменений климата Земного шара: приземная температура» и результаты ее испытания, *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*, № 44, с. 3-11.

Бардин, М.Ю., Ранькова, Э.Я., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф., Корнева, И.А. (2020) Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга, *Метеорология и гидрология*, №. 5, с. 29-45.

**Памяти Михаила Дмитриевича Корзухина
(1941-2023)**



9 апреля 2023 года в возрасте 82 лет ушел из жизни **Корзухин Михаил Дмитриевич**, член редколлегии нашего журнала «Экологический мониторинг и моделирование экосистем» (ЭММЭ), ведущий научный сотрудник ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ФГБУ «ИГКЭ»).

Михаил Дмитриевич родился 5 октября 1941 года в г. Свердловске в семье потомственных интеллигентов. В 1958 г. он поступил на Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, где проходил специализацию на кафедре биофизики. С 1964 по 1967 годы учился в аспирантуре Института прикладной математики АН СССР и в 1970 г. успешно защитил диссертацию «Некоторые асимптотические методы в формальной химической кинетике» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук в Институте химической физики АН СССР.

После защиты диссертации работал в Институте математики СО АН СССР, Научно-исследовательском вычислительном центре АН СССР, Центральном научно-исследовательском институте туберкулеза Минздрава СССР. В 1979 г. М.Д. Корзухин пришёл в ФГБУ «ИГКЭ» (тогда – Лабораторию мониторинга природной среды и климата (ЛАМ) Госкомгидромета и АН СССР). С нашим институтом связан наиболее продуктивный период работы Михаила Дмитриевича: здесь была написана большая часть его работ.

В течение многих лет Михаил Дмитриевич плодотворно занимался моделированием динамики лесных систем, анализом потоков углерода в природных биогеоценозах, оценкой откликов фитоценозов на изменения климата, вопросами мониторинга адаптаций геосистем к антропогенным и климатиче-

ским воздействиям. В область научных интересов Михаила Дмитриевича входило моделирование долговременной динамики границ биомов и конкурентных взаимоотношений в лесных экосистемах, выявление и анализ трендов численности популяций насекомых, а также целый ряд иных вопросов, связанных с функционированием древостоев в нарушенных и ненарушенных экосистемах.

М.Д. Корзухин является автором/соавтором более ста работ, в том числе монографий «Динамика темнохвойно-кедровых лесов» (совм. с К.В. Катаевой, 1987), «Синэкология леса» (совм. с Ф.Н. Семевским, 1992). Он принимал участие в подготовке Второго (2014) и Третьего (2022) оценочного докладов Росгидромета об изменении климата и их последствий на территории Российской Федерации.

В редколлегию нашего журнала Михаил Дмитриевич вошел в 2015 г. и активно участвовал в ее работе. А до этого он был постоянным автором ЭММЭ. Первая его статья «Динамика генотипов в моногамной популяции» (в соавт. с О.З. Кагановой) в нашем журнале (тогда – «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем», ПЭММЭ) была опубликована в 1978 г. в первом номере. С тех пор Михаил Дмитриевич регулярно представлял статьи для публикации: сначала в ПЭММЭ, затем – в ЭММЭ. За все годы в нашем журнале им было опубликовано более 10 работ, характеризующихся высочайшим уровнем исследований.

За многолетнюю успешную работу М.Д. Корзухин был награжден нагрудным знаком «Почетный работник гидрометеослужбы России», а также знаком «Отличник охраны природы».

Михаил Дмитриевич был незаурядным человеком, кроме высокого профессионализма, эрудированности, научной добросовестности ему свойственны были лучшие человеческие качества – внутренняя порядочность, духовность, отзывчивость, готовность помочь поделиться знаниями и опытом. Сохраним о нем светлую память.

Редколлегия ЭММЭ

Изменения химического состава грунтовых вод вокруг Иваньковского водохранилища за 20 лет

Е.Е. Лапина, В.В. Кудряшова, Л.Э. Лапина*

ФГБУН Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3

*Адрес для переписки: khelena1974@mail.ru

Реферат. Уже в конце прошлого века появились прогнозы климатологических изменений, в наибольшей степени учитывающие возрастание температур и осадков. В последние десятилетия влияние климатических изменений на режимные характеристики грунтовых вод доказано многими исследователями. Поскольку Иваньковское водохранилище – это основной питьевой источник Московского мегаполиса стратегического значения, выявление признаков трансформации химического состава вод, непосредственно питающих водохранилище, становится необходимым.

С этой целью обобщены и проанализированы результаты зимних и летних гидрохимических площадных съемок грунтовых вод вокруг водохранилища, проведенных авторами в 1999 и 2019 годах. Обследованы воды колодцев и родников в количестве от 98 до 130 объектов. Статистически установлено, что независимо от сезона за 20 лет произошло снижение медианных значений концентраций почти всех компонентов солевого состава (в наибольшей степени сульфатов – на 50%) и биогенных веществ (на 15-85%) грунтовых вод. Медианные значения общей минерализации снизились на 13% летом и 17% зимой, цветности – на 40 и 75% соответственно. Наибольшее снижение концентраций компонентов химического состава грунтовых вод приурочено к холодному периоду. Одновременно в теплый период наблюдается рост медианных и средних значений содержания иона Mg^{2+} (на 15%) и средних значений концентраций фосфора (на 49%).

Значительное снижение общей минерализации и цветности в холодный период, скорее всего, обусловлено разбавлением грунтовых вод талыми во время оттепелей. В то же время резкое снижение медианных значений содержаний сульфатов и нитратов связано с упадком сельского хозяйства и промышленности в регионе, что доказано нашими предыдущими исследованиями. Следовательно, наблюдаемая трансформация химического состава грунтовых вод является многофакторным процессом. Методом исключения установлено, что наиболее вероятной причиной увеличения содержания магния являются атмосферные осадки, а фосфора – зафосфачивание почвенного покрова.

Ключевые слова. Иваньковское водохранилище, грунтовые воды, химический состав, магний, фосфор, снеготаяние, зафосфачивание почв.

Changes in the chemical composition of groundwater around the Ivankovo reservoir over 20 years

E.E. Lapina, V.V. Kudryashova, L.E. Lapina*

Moscow, Water Problems Institute RAS,
3, Gubkina str., 119333, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *khelena1974@mail.ru*

Abstract. Already at the end of the last century, forecasts of climatological changes appeared, taking into account the increase in temperatures and precipitation to the greatest extent. In recent decades, the impact of climate change on the regime characteristics of groundwater has been proven by many researchers. Since the Ivankovo reservoir is the main drinking source of the Moscow metropolis of strategic importance, it becomes necessary to identify signs of the transformation of the chemical composition of the waters directly feeding the reservoir.

For this purpose, the results of winter and summer hydrochemical areal surveys of groundwater around the reservoir, conducted by the authors in 1999 and 2019, are summarized and analyzed. The waters of wells and springs were examined in the amount from 98 to 130 objects. It has been statistically established that, regardless of the season, over 20 years there has been a decrease in the median values of the concentrations of almost all components of the salt composition (mostly sulfates – by 50%) and nutrients (by 15-85%) of groundwater. The median values of total mineralization decreased by 13% in summer and 17% in winter, and color values decreased by 40 and 75%, respectively. The greatest decrease in the concentrations of the components of the chemical composition of groundwater is confined to the cold period. At the same time, during the warm period, there is an increase in the median and average values of the content of the Mg^{2+} ion (by 15%) and the average values of phosphorus concentrations (by 49%).

A significant decrease in the total mineralization and color in the cold period is most likely due to the dilution of groundwater with melt water during thaws. At the same time, a sharp decrease in the median values of sulfates and nitrates is associated with the decline of agriculture and industry in the region, as proven by our previous studies. Therefore, the observed transformation of the chemical composition of groundwater is a multifactorial process. By the method of exclusion, it was found that the most likely cause of an increase in the content of magnesium is precipitation, while the reason of phosphorus content increase is the phosphating of the soil cover.

Keywords. Ivankovo reservoir, groundwater, chemical composition, magnesium, phosphorus, snowmelt, soil phosphating.

Введение

Химический состав – одна из главных характеристик грунтовых вод. Авторами установлено, что с 1999 г. по 2019 г. (20 лет) на примыкающей к Ивановскому водохранилищу территории произошла замена преобладающего катионного состава грунтовых вод с $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ на $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ (Лапина, Кудряшова, 2021; Lapina et al., 2021). Класс грунтовых вод пока стабилен, но в катионном ряду произошло увеличение содержания доли ионов магния (Mg^{2+}).

Объектом исследований стали грунтовые воды, питающие Ивановское водохранилище – основной источник питьевого водоснабжения Москвы. Цель работы – количественная оценка изменений химического состава грунтовых вод за 20 лет (1999-2019 гг.) и выявление их причин. В начале создания Ивановское водохранилище имело статус мезотрофного. В зависимости от используемого критерия оценки сейчас оно считается «переходным к эвтрофному» или «эвтрофным» (Корнева, 2015). Трофность водоема зависит от соотношения в воде азота (N) и фосфора (P). Особую тревогу вызывает P, о росте которого в окружающей среде региона сообщают многие авторы (Мотузова и др., 2010; Шилькрот, 2015). Таким образом, основными задачами работы стало подтверждение роста концентраций Mg^{2+} и статистический анализ динамики содержания биогенных веществ в грунтовых водах за 20 лет.

Методы и материалы

В работе применены методы статистического анализа и полевых исследований. В основу легли собственные данные площадных съемок химического состава вод колодцев и родников. Съемки проведены в зимнюю и летнюю межень 1999-2000 (98 объектов) и 2018-2019 гг. (130 объектов) вокруг Ивановского водохранилища, на территории Конаковского и в восточной части Калининского районов (рис. 1, 2). Пробы воды отбирали в соответствии с (ГОСТ 31612012, 2012).

Химические анализы выполнены в лаборатории филиала Института водных проблем РАН – Ивановской научно-исследовательской станции, расположенной в г. Конаково. Ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} определены титриметрическим (с трилоном Б) методом, цветность – колориметрическим по Pt-Co шкале, Cl^- – аргентометрическим, SO_4^{2-} – турбидиметрическим с BaCl_2 , Na^+ и K^+ – потенциометрическими методами. Концентрации NH_4^+ определены с реактивом Несслера, NO_3^- – с салицилатом натрия, $\text{P}_{\text{общ}}$ и PO_4^{3-} – с аскорбиновой кислотой (Новиков и др., 1990).

I этап – проверили данные, из анализа исключили пробы, отобранные из глубоких колодцев и с экстремальными значениями хлоридов и сульфатов.

II этап – разбили данные по принципу локализации колодцев на правый и левый берег (в силу разной антропогенной нагрузки берегов), применили метод главных компонент.

III этап – выбрали данные по одним и тем же колодцам с целью подтверждения полученных выводов и для устранения влияния особенностей геологического строения и степени нагрузки из разных временных периодов (Lapina et al., 2021). Для уточнения тенденций использовали данные многолетних режимных наблюдений за химическим составом вод опорных объектов.



Рисунок 1. Отбор проб из колодца в д. Окулово, 2019 г.
(исполнители – Е.Е. Лапина и В.В. Кудряшова)

Figure 1. Sampling from a well, Okulovo village, 2019
(samplers – E.E. Lapina and V.V. Kudryashova)



Рисунок 2. Режимный родник в реликтовом сосновом бору, 2019 г.

Figure 2. Regime spring in a relict pine forest, 2019 year

Природные условия

Водохранилище создано в 1937 г. на отрезке Волги от Твери до Дубны. Климат здесь умеренно-континентальный, средняя температура самого теплого месяца $+18.1^{\circ}\text{C}$, холодного -7.2°C ; за последние 30 лет в зимние месяцы на 0.04°C в год растет температура воздуха (Лапина, Григорьева, 2020). Годовая сумма осадков варьирует от 550 до 700 мм. В тектоническом отношении район приурочен к северо-западной части Московского артезианского бассейна. Почвы – дерновые разной степени оподзоленности, зона аэрации выполнена песками и моренными суглинками. Доля подземного притока в реки от среднегодовалого стока в устье составляет в среднем 32% (Иваньковское..., 2000). Региональный поток грунтовых вод направлен к реке Волге, их состав $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, реже – $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, с общей минерализацией $0.1\text{-}0.6 \text{ мг дм}^{-3}$. Глубины колодцев в среднем составляют 4.0-8.0 м. На рис. 3 представлена карта фактического материала площадных съемок грунтовых вод вокруг Иваньковского водохранилища. Указаны опробованные несколько раз во время съемок колодцы/родники и отдельно – режимные колодцы, створы на реках, скважины ручного бурения. В левом верхнем углу под литерой А дана карта – врезка части водосбора р. Донховка; показаны федеральные трассы.

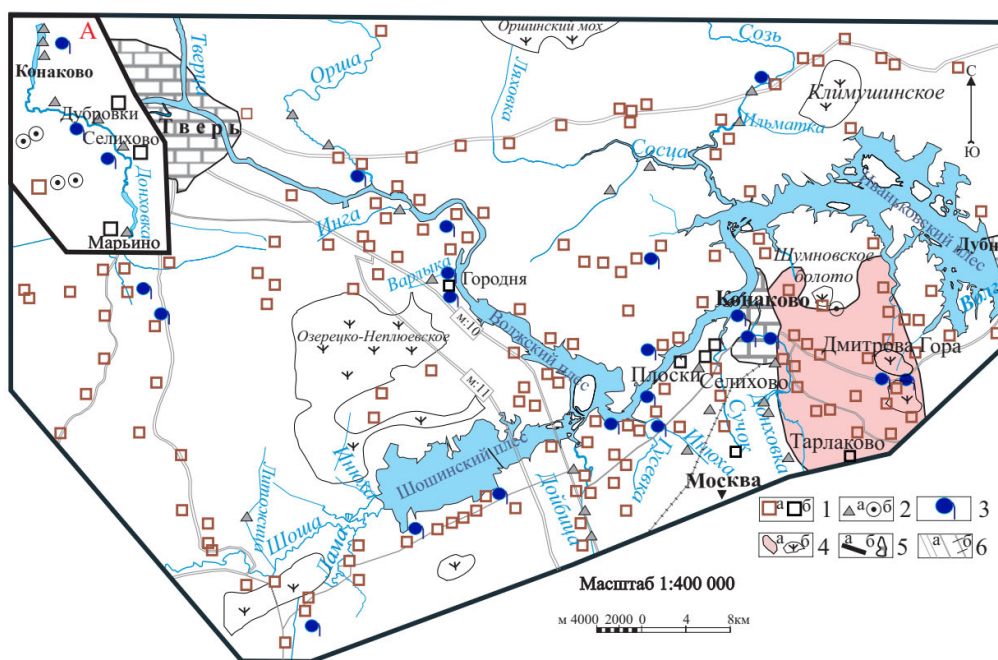


Рисунок 3. Карта фактического материала площадных съемок региона
 Условные обозначения: 1. а – обследованные колодцы, б – режимные колодцы, 2. а – гидрост, б – скважина; 3. Родники; 4. а – земли Агрохолдинга; б – болота; 5. а – граница карты врезки, буква А, водосбор р. Донховка; б – города; 6. Дороги, а – автомобильные, б – железная

Figure 3. A factographic map of areal surveys of the region
 Legend: 1. a – sampled wells; b - regime wells. 2. a - alignments on the rivers, b - hand-drilled well; 3. springs, 4. a – agricultural land of the Agroholding; b – mires; 5. a – boundary of the inset map, letter A, watershed area of the river Donkhovka; b – cities; 6. a – motor roads; b – railway

Гидрохимическая съемка проводилась по периметру водохранилища в полосе шириной до 17 км от уреза. Уровень антропогенной нагрузки на его берегах разный. Правобережье подвержено высокой антропогенной нагрузке. Здесь проходят федеральные трассы Москва – Санкт-Петербург М-10 и М-11, Октябрьская железная дорога, находятся г. Конаково, поселки городского типа, ООО «Дмитрогорское», входящее в крупный сельскохозяйственный Агрохолдинг «Агропромкомплектация» (далее агрохолдинг), расположенный вокруг с. Дмитрова Гора, дачные участки. На левом берегу располагаются лишь бывшие редкие деревни – ныне дачные поселения, и автотрасса Тверь – Кимры.

Результаты и обсуждение

Итоги статистической обработки данных и их анализ

По итогам II этапа исследования установлено, что солевой состав и цветность грунтовых вод согласно методу главных компонент определяют 50 % общей дисперсии. Статистический анализ показал, что независимо от сезона произошло снижение концентраций в водах всех ингредиентов, кроме магния и фосфора. Концентрации Mg^{2+} в водах растут на обоих берегах, а P – на правом, причем только в летний период. В табл. 1 показана динамика статистических характеристик Mg^{2+} и P (по $P_{общ}$) летом.

Таблица 1. Статистические характеристики содержания Mg^{2+} и $P_{общ}$ в грунтовых водах на правом и левом берегах водохранилища в летний период (мг dm^{-3})

Table 1. Statistical characteristics of the content of Mg and P tot in groundwater on the right and left banks of the reservoir in summer (mg dm^{-3})

Год	n	K_v , %	Max	Min	\bar{x}	Me(x)	σ
Левый берег							
1999	26	0.65/2.01 ¹	40.3/21.9	3.0/0.08	15.7/2.65	12.2/0.49	10.2/5.33
2019	40	0.6/1.27	78.1/9.75	3.4/0.04	28.1/1.07	24.4/0.18	17.0/2.13
Правый берег							
1999	66	0.6/1.4	63.4/3.29	2.4/3.0	23.4/0.48	22.0/0.22	14.0/0.67
2019	80	0.67/0.33	106.9/5.96	3.4/0.028	31.4/0.661	27.0/0.195	21.0/0.22

Примечание: 1 – В числителе значения концентраций магния, в знаменателе – фосфора, по $P_{общ}$

Коэффициент вариации K_v показывает пространственную неоднородность показателей. Распределение концентраций Mg^{2+} на берегах отличается стабильностью (узкий интервал варибельности 0.6-0.67), у фосфора пространственная неоднородность уменьшилась.

В водах левобережья произошло снижение медианных и средних значений содержаний P, правобережья – медианные значения снизились при одновременном увеличении средних. Средние значения концентраций более чувстви-

тельны к локальным участкам загрязнения по сравнению с медианными: наличие нескольких таких участков приводит к более значимому росту среднего. Большая разница между средним и медианным значениями может указывать и на отсутствие нормального закона распределения случайной величины, и на появление локальных участков с экстремальными концентрациями компонента.

Закон нормального распределения обычно не выполняется для гидрохимических показателей. Именно поэтому медианные значения являются более информативными и корректнее отражают картину пространственного распределения.

По итогам III этапа рассмотрим подробнее количественные изменения показателей. Статистические характеристики динамики солевых компонентов грунтовых вод даны в (Lapina et al., 2021). В табл. 2 представлено межennale снижение медианных значений гидрохимических показателей (съемки 1999 и 2019 гг.).

Таблица 2. Приращения медианных значений гидрохимических показателей грунтовых вод в межень 1999 и 2019 гг. по одним и тем же колодцам (мг дм⁻³)

Table 2. Increments of median values of hydrochemical parameters of groundwater in low water periods in 1999 and 2019 on the same wells (mg dm⁻³)

Сезон	Приращения медианных значений показателя (%)								
	Mz ¹	Цв -ть ²	SO ₄ ²⁻	Cl	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
Зима	(-17)	(-75)	(-53)	(-60)	(-44)	(-22)	(-17)	(-69)	(-85)
Лето	(-13)	(-40)	(-55)	(-30)	(-29)	(-13)	(+19)	(-70)	(-64)

Примечание: 1 – Mz – общая минерализация; 2 – Цветность, градус по Pt-Co шкале.

Из табл. 2 видно, что наибольшее снижение медианных значений, особенно заметное для цветности, содержаний ионов Cl, Na⁺, SO₄²⁻ и NH₄⁺, приурочено к зимней межени. Приращения медианных значений концентраций ионов K⁺, HCO₃⁻, соединений P достаточно малы и здесь не отражены. Возрастание значений произошло только у Mg²⁺, причем в летний период. Также из табл. 2 очевидно изменение соотношения ионов Ca²⁺ и Mg²⁺, более явное летом, чем зимой.

Рассмотрим динамику биогенных показателей, влияющих на эвтрофирование водоемов – соединений N и P. В табл. 3 показаны их статистические характеристики в грунтовых водах. В последнем столбце таблицы даны приращения средних и медианных значений концентраций – разницы между значениями 1999 и 2019 гг.

Очевидно снижение содержания биогенных веществ и зимой, и летом, наиболее значительное для иона NO₃⁻. Уменьшение содержания иона NH₄⁺ происходит в большей степени зимой, чем летом; рост средних значений соединений P наблюдается только летом.

Таблица 3. Статистические характеристики соединений N и P (мг дм⁻³) в грунтовых водах прибрежной зоны Иваньковского водохранилища

Table 3. Statistical characteristics of N and P compounds (mg dm⁻³) in groundwater in the coastal zone of the Ivankovo reservoir

Параметр	Max	Min	\bar{x}	Me(x)	σ	Приращение	
						\bar{x}	Me(x)
Зима 1999/2019 (n=47)							
P _{общ}	4.5/5.8 ¹	0.01/0.07	0.53/0.45	0.2/0.19	0.91/0.90	-0.08	-0.01
PO ₄	4.5/5.37	0/0.01	0.45/0.35	0.15/0.09	0.83/0.85	-0.1	-0.75
NH ₄	3.4/1.17	0.08/0.02	0.65/0.16	0.55/0.08	0.52/0.23	-0.49	-0.47
NO ₃	138.2/66.6	0.09/0.18	31.9/15.7	20/6.2	34.8/18.4	-13.8	-16.4
Лето 1999/2019 (n=63)							
P _{общ}	3.92/6.92	0.02/0.06	0.51/0.81	0.23/0.19	0.68/1.48	+0.3	-0.05
PO ₄	2.88/6,05	0.01/0.02	0.39/0.67	0.14/0.11	0.64/1.40	+0.29	-0.03
NH ₄	2.27/3.2	0.13/0.02	0.52/0.30	0.45/0.16	0.36/0.46	-0.21	-0.29
NO ₃	138.26/107.3	0.01/0.25	36.45/15.8	23.76/7.2	38.23/21.6	-20.68	-16.63

Примечание: 1 – в числителе данные за 1999, в знаменателе – за 2019 г.

Сравнение качества воды колодцев проводилось между двумя съемками, то есть с перерывом в 20 лет. Для подтверждения выявленных тенденций рассмотрим химический состав вод в ежегодном формате по данным мониторинга. В режимную сеть станции входят колодцы, реки и родники. Обратим внимание на показатели, приращения которых максимальны (табл. 2): ионы NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ и P. Рассмотрим наиболее типичные объекты.

На рис. 4 показана многолетняя динамика концентраций ионов Mg²⁺ и Ca²⁺ в сентябре с 1999 по 2019 гг. в колодце д. Тарлаково (см. рис. 3).

На графике виден тренд на убывание в содержании иона Ca²⁺ и стабильность иона Mg²⁺, что подтверждает изменение их соотношения в ионном составе грунтовых вод.

Химический состав вод рек в межень априори считается сходным с составом грунтовых вод водосбора. На р. Донховке – правом притоке водохранилища, режимные наблюдения ведутся авторами с 1997 г., с частотой 8-10 раз в год (врезка, рис. 3). На рис. 5 показана динамика среднемеженных концентраций биогенных веществ, ионов Cl⁻ и SO₄²⁻ в реке, створ с. Селихово, VI-IX, 1999-2019 гг.

Очевидно, что в притоках водохранилища наблюдаются те же тенденции, что и в грунтовых водах: снижение концентраций ионов SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻ и рост P_{общ}.

Родниковый сток отражает интегральную характеристику химического состава грунтовых вод его водосборной площади. В опорных объектах мони-

торинга гидрохимические характеристики определяют круглогодично дважды в месяц. Родник в бору (Бор) наблюдается как фоновый (см. рис. 2), выходит в борту террасы Волги (Лапина и др., 2014). На рис. 6 даны кривые многолетней динамики ионов NO_3^- и $\text{P}_{\text{общ}}$ в воде родника Бор за период 2006-2020 гг.

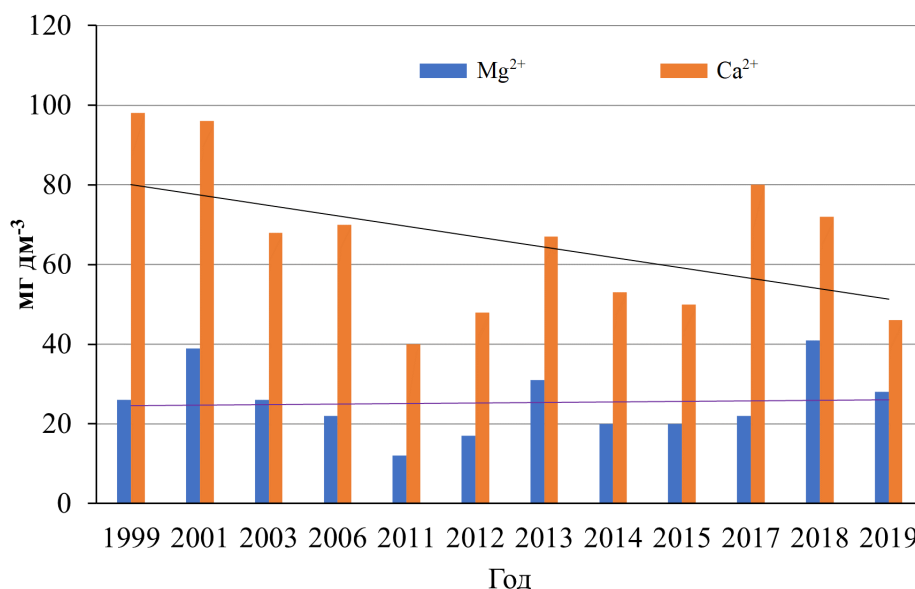


Рисунок 4. Динамика концентраций ионов Mg^{2+} и Ca^{2+} , mg dm^{-3} , с линией тренда. Колодец, с. Тарлаково, сентябрь, 1999-2019 гг.

Figure 4. Dynamics of the concentrations of Mg^{2+} and Ca^{2+} ions, mg dm^{-3} , with a trend line. Well, s. Tarlakovo, September, 1999-2019

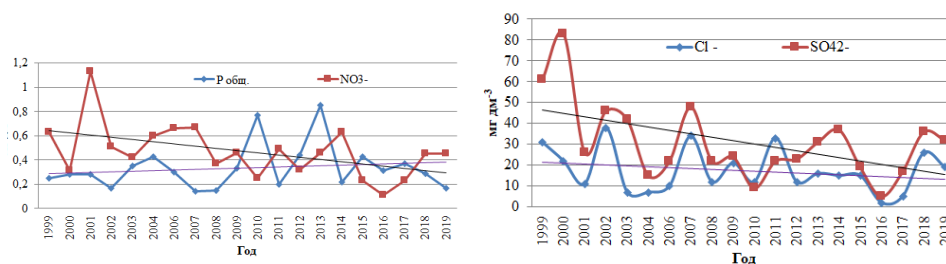


Рисунок 5. Многолетняя динамика среднемежных значений ионов $\text{P}_{\text{общ}}$ и NO_3^- (слева), ионов Cl^- и SO_4^{2-} (справа), mg dm^{-3} , с линией тренда, р. Донховка, створ Селихово (VI-IX, 1999-2019 гг.)

Figure 5. Long-term dynamics of mean interim values of $\text{P}_{\text{общ}}$ and NO_3^- ions (left) and Cl^- and SO_4^{2-} ions (right), mg dm^{-3} , with a trend line, r. Donkhovka, Selikhovo alignment (VI-IX, 1999-2019)

По ходу кривых наблюдается тренд на снижение для ионов NO_3^- , на увеличение – для $\text{P}_{\text{общ}}$.

На рис. 7 показана динамика отношения $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ в опорных родниках с разной локализацией.

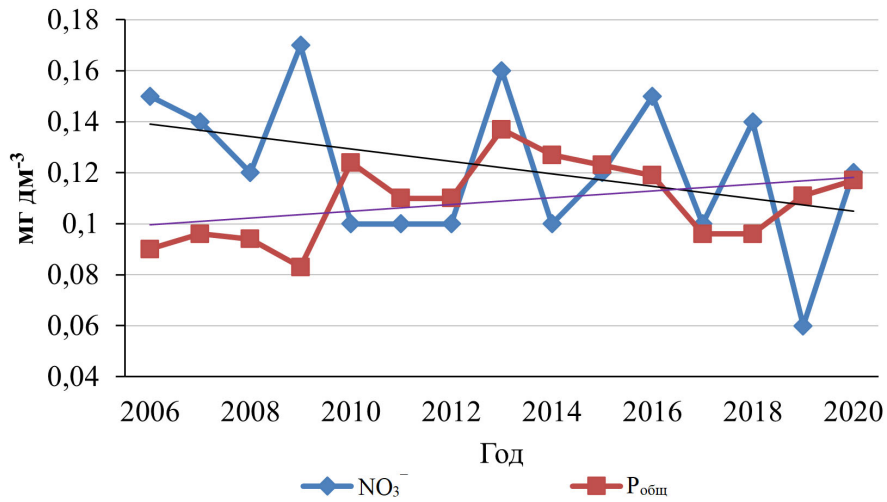


Рисунок 6. Динамика среднегодовых концентраций ионов NO₃⁻ (мг дм⁻³) и P_{общ} (мг дм⁻³), с линией тренда, родник Бор, 2006-2020 гг.

Figure 6. Dynamics of the average annual concentrations of NO₃⁻ ions (mg dm⁻³) and P tot (mg dm⁻³), with a trend line, spring Bor, 2006-2020

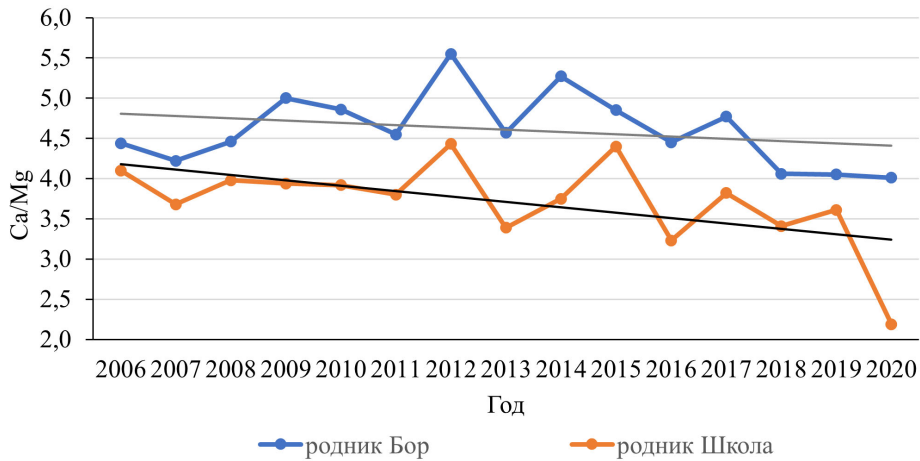


Рисунок 7. Изменение отношения среднегодовых концентраций ионов Ca²⁺ и Mg²⁺ в родниках Бор (фон) и Школа (город) с линией тренда, 2006-2020 гг.

Figure 7. Change in the ratio of the average annual concentrations of Ca²⁺ and Mg²⁺ ions in the Bor (Pine forest) and School (city) springs with a trend line, 2006-2020

На графиках виден тренд на снижение величины соотношения вне зависимости от расположения водосборной площади родников. По данным статистического анализа K_v отношение Ca^{2+}/Mg^{2+} летом снижается в два раза, что предполагает и возрастание концентраций ионов Mg^{2+} в летнюю межень, и снижение концентраций Ca^{2+} .

Многолетние наблюдения на опорных объектах в сети мониторинга подтверждают выявленные тенденции изменения химического состава грунтовых вод. Перейдем к выявлению причин роста содержаний в водах Mg^{2+} и $P_{общ}$.

Возрастание концентраций иона Mg^{2+} в грунтовых водах

Рассмотрим возможные источники Mg^{2+} в регионе и вероятность их реального влияния на его содержание в грунтовых водах.

1. Бурение глубоких скважин владельцами дачных домов, когда из-за отсутствия крепления обсадных труб возможен заколонный переток насыщенных ионом Mg^{2+} вод из нижележащих пластов в вышележащие. Из-за малочисленности таких скважин эта причина не может вызвать площадного изменения состава грунтовых вод.

2. Применение доломитовой муки для улучшения плодородия почв. В хозяйствах региона магниевые удобрения из-за повышенной стоимости не используют. Их применяют в дачных поселениях, большинство которых располагается на правом берегу. Однако концентрации Mg^{2+} выросли на обоих берегах водохранилища.

3. Потепление зим, когда химический состав вод в теплое время года формируется за счет верхних водоносных горизонтов, а в холодное – более глубоких горизонтов зоны активного водообмена (Боревский, Марков, 2014). Тогда при снижении цветности увеличилась бы минерализация грунтовых вод, а она упала. Указанный источник Mg^{2+} может учитываться на западе территории, где местами встречаются субнапорные подземные воды $HCO_3 - Mg$ состава, что требует детального изучения и пока нами не рассматривается.

4. Атмосферные осадки. Анализ имеющихся данных приводит к выводу о наиболее вероятном поступлении Mg^{2+} атмосферным путем.

Основной процесс изменения состава лежалого снега состоит в растворении карбонатов кальция и магния, поступающих в снег с пылеватыми частицами (Красинцева и др., 1977). Результаты снегосъемки, проведенной авторами в пределах г. Конаково в марте 2009 г., выявили в 94% образцов отсутствие иона Ca^{2+} , а диапазон концентраций Mg^{2+} составил 1.22-1.83 мг $дм^{-3}$, что так же может быть обусловлено и составом противогололедных реагентов. В 2018 г. итоги снегосъемки по г. Конаково (Комиссаров, Чекмарева, 2019) дали интервал концентраций Mg^{2+} 0.5-1.0 мг $дм^{-3}$, что подтверждает высокую вариабельность химического состава осадков (Посохов, 1985).

Зимой 2022 г. для проверки факта накопления ионов Mg^{2+} раз в месяц отбирали пробы снега. Место отбора – сосновая роща, инструмент – пластиковая труба, таяние проведено при комнатной температуре. Высота колонки в январе и апреле составила 15 см, в феврале и марте – 30 см. Результаты анализов представлены в табл. 4.

Таблица 4. Динамика содержания иона Mg^{2+} ($mg\ dm^{-3}$), снег, I-IV. 2022 г.

Table 4. Dynamics of Mg^{2+} ion content ($mg\ dm^{-3}$), snow, I-IV. 2022

Глубина, см	Дата отбора снега			
	15.01.2022	15.02.2022	17.03.2022	01.04.2022
0 -15	0.98	0.98	1.45	0.48
15-30	-	0.49	3.45	-

В феврале-марте происходит увеличение концентраций Mg^{2+} в снеговой толще, с началом снеготаяния – уменьшение, скорее всего, вызванное выносом тальными водами. Наблюдения за уровнями грунтовых вод в скважинах на надпойменных террасах показали, что весной талые воды поступают на зеркало грунтовых вод импульсно, уровень повышается резко на 0.2-0.25 м (Лапина и др., 2014). По трещинам и т.п. талые воды сразу поступают на зеркало либо задерживаются в слабопроницаемых слоях зоны аэрации, постепенно продвигаясь вниз с инфильтрационными водами. Расчет содержания Mg^{2+} в талых водах при средней высоте лежалого снега 0.3 м и средних влагозапасах 100 мм (Мирзоев, Мирзоев, 1995) на территории г. Конаково площадью $38\ km^2$ дает цифру 4.64 т, что составит 400 мг на $1\ m^2$, или в почвенном растворе в $1\ m^3$ почвогрунта при полном насыщении концентрация Mg^{2+} возрастет на $0.4\ mg\ dm^{-3}$.

По данным (Еремина, 2019), в Московской области, где климат аналогичный, среднее содержание Mg^{2+} составляет $0.17\ mg\ dm^{-3}$. Регулярные наблюдения за химическим составом осадков (г. Конаково, 2008-2013 гг.) дают интервал содержания Mg^{2+} $0.4-4.3\ mg\ dm^{-3}$ (Лапина и др., 2014). В табл. 5 показано содержание Mg^{2+} летом 2018 и 2019 гг. в единичных пробах.

Таблица 5. Содержание иона Mg^{2+} ($mg\ dm^{-3}$) в осадках, г. Конаково (VI-VIII)

Table 5. Content of Mg^{2+} ion ($mg\ dm^{-3}$) in precipitation, Konakovo (VI-VIII)

2018 г.		2019 г.		
Месяц				
VI	VII	VI	VII	VIII
1.46	1.0	2.3	1.83	2.93

Эти данные в совокупности с результатами снегосъемок 2009 и 2018 гг. позволяют предположить транзитный путь его поступления, так как ионный состав осадков в районе работ либо HCO_3-Ca (Мотузова и др., 2009; Лапина и др., 2014), либо $SO_4-HCO_3^- -Ca$ (Цыганов, 2019). Именно потому, что осадки, содержащие Mg^{2+} , проходят транзитом, наблюдается рост Mg^{2+} в грунтовых водах на обоих берегах водохранилища.

Доказательством гипотезы поступления Mg^{2+} в грунтовые воды с осадками является изменение химического состава вод болота Шумново. Это болото верхового типа, питание которого осуществляется только атмосферным путем. Начиная с 2014 г., в катионном ряду болотных вод преобладают ионы Mg^{2+} (Лапина, 2021).

Возрастание концентрации фосфора в грунтовых водах

Снижение концентраций биогенных веществ, кроме фосфора, и его рост в водах только на правом берегу с наступлением тепла, указывает на следующие возможные источники его поступления в грунтовые воды.

Атмосферные осадки. Доля поступления фосфора на территории центра России за счет осадков составляет от 5-12% (Моделирование ..., 1995) до 17% (Еремина, 2019). Данные авторов позволяют определить, что с 2008 по 2013 гг. с дождями за год поступало в среднем 0.3, со снегом – 0.07 кг га⁻¹ год Р, а в 2019 г. – соответственно 0.15 и (по Комиссаров, Чекмарева, 2019) – 0.045 кг га⁻¹ год Р. Представленные цифры не сопоставимы с количеством вносимых фосфорных и органических удобрений – до 70 кг га⁻¹ Р (по данным Тверского Статуправления), поэтому осадки не являются основным источником роста фосфора.

Сточные воды дачных и коттеджных поселков. Согласно данным Управления Росреестра по Тверской области на 01.01.2019 г., площадь земель сельскохозяйственного назначения составляла 24.4, населенных пунктов без г. Конаково – 5.2, садоводческих товариществ – 1.3% от всей площади Конаковского района (Отчет..., 2020). Для определения поступления в окружающую среду Р от поселений проведем простой расчет для реального садоводческого некоммерческого товарищества (СНТ) «Ремонтник», общей площадью 65 га. СНТ состоит из 700 отдельных участков, находится близ д. Плоски (см. рис. 3), в среднем дачники проживают на своих участках 4 месяца в году. Условимся, что на каждом участке живет 4 человека. В сутки от жизнедеятельности взрослого человека в окружающую среду поступает суммарно по твердым и жидким отходам 1.35 г Р₂О₅ (Прянишников, 1952). Несложный пересчет дает цифру поступления за 4 месяца в окружающую среду на территории СНТ 2.46 кг га⁻¹ Р, что с учетом их площадной доли (1.3 %) также исключает этот источник как основной. Жители коттеджных поселков малочисленны и редко приезжают.

Удобряемые почвы сельхозугодий. По данным (Мотузова и др., 2010), значительная часть антропогенной нагрузки по Р для грунтовых вод территории исходит от почв.

Имеющиеся данные позволили сравнить химический состав почв в одном и том же месте до роста сельскохозяйственной нагрузки и после. Пробуренные скважины расположены близ Шумновского болота (см. рис. 3). В 2005 г. в почвах залежи содержание подвижного Р (по Кирсанову) не превышало 30-50 мг Р₂О₅/кг сухой породы. В 2018 г. пустующие земли приобрел агрохолдинг, их вспахали, удобрили, согласно данным Тверьстатуправления, в дозе 141 кг д.в./га минеральных и приблизительно 40 т га⁻¹ органических удобрений, посадили кукурузу. В октябре 2019 г. на прежнем месте содержание подвижного фосфора в почвенном слое до глубины 30 см составило 1480-1650 мг Р₂О₅/кг сухой породы. Следовательно, произошел существенный рост подвижного фосфора (в 30-50 раз). Согласно данным (Титова и др., 2011), содержание в дерново-подзолистых почвах подвижного Р в среднем 1200 мг Р₂О₅/кг относится к гипервысоким.

Преыдущими исследованиями почв береговой зоны доказано, что лишь 10-15% от количества внесенных фосфорных удобрений усваиваются растениями (Лола и др., 1988), часть закрепляется в почвенном слое, а остаток по сложенной песками зоне аэрации может продвигаться с инфильтрационными водами вниз.

Таким образом, именно зафосфачивание почв сельскохозяйственных угодий можно считать наиболее вероятным источником обогащения грунтовых вод фосфором.

Заключение

Изучению влияния климатических изменений на режимные характеристики подземных вод, в том числе грунтовых, посвящено много работ. Основы исследований заложены В.С. Ковалевским (Ковалевский и др., 1999). Исследуются главным образом гидродинамические процессы. Например, в работе (Гриневский, Поздняков, 2017) показано, что на ю-з Московского артезианского бассейна наблюдается рост среднемноголетнего инфильтрационного питания подземных вод на 20-30 мм год⁻¹. Трансформация химического состава грунтовых вод в связи с изменением климата пока изучена слабо. В работе (Шилькрот, 2015) отмечен рост содержания фосфора в грунтовых водах близ Валдайского заповедника в Тверской области, обусловленный именно потеплением. Другие авторы (Смоляр, 2017) считают, что нет прямого доказательства связи между изменением климата и трансформацией грунтовых вод.

Установлено, что при изучении химического состава природных вод с помощью статистических методов на достаточно больших территориях важно знать и средние, и медианные значения, так как между ними наблюдается большая разница; разнонаправленность указывает на наличие локальных источников загрязнения.

Представленные результаты исследования выявили трансформацию химического состава грунтовых вод за 20 лет и ее зависимость от роста температур воздуха зимой. Увеличение питания грунтовых вод из-за оттепелей подтверждено повсеместным снижением медианных значений общей минерализации и цветности на 17 и 75% соответственно в холодный период. Уменьшение концентраций сульфатов и хлоридов, вероятно, связано с упадком промышленности в регионе.

Снизилась концентрация всех компонентов солевого состава грунтовых вод, кроме Mg²⁺. Возможной причиной роста концентраций Mg²⁺ является его поступление с атмосферными осадками. Согласно (Еремина, 2019) в осадках г. Москвы на территории Ботанического сада катионный состав постоянен, доминирует ион Ca²⁺. Следовательно, рост Mg²⁺ в грунтовых водах может быть региональной особенностью.

Медианные и средние значения содержаний всех биогенных веществ снизились на 15-85% зимой, на 20-50% летом, кроме средних значений концентраций P, возросших на 49%. Ранее считалось, что фосфор удобрений

выносятся с урожаем, а его остатки закрепляются в верхнем почвенном слое и в грунтовые воды не проникают. В последние годы многие исследователи сообщают о явной фосфатизации гидросферы и литосферы, что говорит о нарушении распределения и миграции фосфора в окружающей среде (Титова и др., 2011; Шилькрот, 2015).

Методом исключения показано, что главный источник поступления фосфора в грунтовые воды – это зафосфачивание почв сельскохозяйственных угодий, вызванное избыточным внесением фосфорных удобрений и навоза, который способствует росту подвижности фосфора (Титова и др., 2011). Ни поступление соединений фосфора с атмосферными осадками, ни сточные воды садоводческих товариществ и дачных поселений не оказывают существенного воздействия на его концентрации в грунтовых водах. Полученные результаты не противоречат исследованиям других авторов (Ясинский, Даденко, 2018). Выявленные тенденции подтверждены данными многолетних непрерывных наблюдений за составом вод режимных объектов.

Ситуация поступления фосфатов в грунтовые воды прибрежной территории Иваньковского водохранилища усугубляется тем, что именно здесь распространены почвы легкого гранулометрического состава, подстилаемые флювиогляциальными песками. Опасность евтрофирования водоемов и водотоков береговой зоны возрастает по причине роста фосфора на фоне снижения азота, поэтому необходимо ужесточить контроль за соотношением этих питательных элементов в силу питьевого назначения Иваньковского водохранилища.

Одной из мер улучшения ситуации может быть введение государственного контроля за агротехническими работами частных сельскохозяйственных организаций.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002

(№ государственной регистрации Государственного задания ИВП РАН 122041100236-4).

Список литературы

Боревский, Б.В., Марков, М.Л. (2014) Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока, *Разведка и охрана недр*, № 5, М., ФБГУ «ВИМС», с. 10-16.

ГОСТ 31861-2012 «Вода. Общие требования к отбору проб» (2013) М., Стандартинформ, 32 с.

Гриневский, С.О., Поздняков, С.П. (2017) Ретроспективный анализ влияния климатических изменений на формирование ресурсов подземных вод, *Вестн. Моск. Ун-та*, сер. 4. Геология, № 2, с. 42-51.

Иваньковское водохранилище: современное состояние и проблемы охраны (2000) М., Наука, 344 с.

Еремина, И.Д. (2019) Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений, *Вестник Московского университета*, серия 5, География, № 3, с. 3-10.

Ковалевский, В.С., Федорченко, Е.А., Клиге, Р.К. (1999) Возможные изменения запасов и уровней грунтовых вод в бассейне Волги, *Известия АН. Серия географ.*, № 5, с. 61-67.

Комиссаров, А.Б., Чекмарева, Е.А. (2019) Оценка качества снежного покрова на водосборной территории Ивановского водохранилища, *Экологический сб. 7. Труды мол. ученых. Всерос. мол. конф.*, Тольятти, ИЭВБ РАН, «Анна», с. 238-242.

Корнева, Л.Г. (2015) *Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги*, Кострома, Костромской печатный дом, 284 с.

Красинцева, В.В., Кузьмина, Н.П., Сеньявин, М.М. (1977) *Формирование минерального состава речных вод*, М., Наука, 176 с.

Лапина, Е.Е. (2021) Динамика гидрохимического состава выработанных верховых болот (Тверская область), *Мат-лы конф. «XI Галкинские чтения»*, СПб, БИН РАН, с. 130-131.

Лапина, Е.Е., Ахметьева, Н.П., Кудряшова, В.В. (2014) *Родники долины верхней Волги и ее притоков: условия формирования, режим, охрана*, ООО «Купол», Тверь, 256 с.

Лапина, Е.Е., Кудряшова, В.В. (2021) Тенденции изменения химического состава грунтовых вод водосбора вокруг Ивановского водохранилища. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов, *Труды VII всеросс. н-пр. конф. с междунар. участием*, Пермь, с. 307-311.

Лапина, Л.Э., Григорьева, И.Л. (2020) Анализ изменения температуры воздуха и суммы осадков по данным метеостанций Старица и Тверь за многолетний период, *Вестник ТвГУ, серия "География и геоэкология"*, № 31, с. 57-78, doi 10.26456/2226-7719-2020-3-59-80.

Лола, М.В., Ахметьева, Н.П., Григорьев, В.Т., Лахтюк, Р.А. (1988) Содержание в почвах биогенных веществ и их влияние на евтрофирование водоема, *Водные ресурсы*, № 6, с. 108-116.

Новиков, Ю.В., Ласточкина, К.О., Болдина, З.Н. (1990) *Методы исследования качества воды водоемов*, под ред. А.П. Шицковой, М., Медицина. 400 с.

Мирзоев, Е.С., Мирзоев, А.Е. (1995) *Конаковский район. Краеведческий справочник*, Тверь, 330 р.

Моделирование режима фосфора в долинном водохранилище (1995) Под ред. К.К. Эдельштейна, М., Изд-во МГУ, 80 с.

Мотузова, Г.В., Барсова, Н.Ю., Карпова, Е.А., Кочарян, А.Г. (2009) Формирование химического состава почвенных вод в береговой зоне Ивановского водохранилища, *Известия РАН. Серия географ.*, № 3, с. 109-117.

Мотузова, Г.В., Барсова, Н.Ю., Карпова, Е.А., Кочарян, А.Г. (2010) Состав лизиметрических вод почв Верхневолжских ландшафтов, *Почвоведение*, № 2, с.1-9.

Отчет о наличии земель Конаковского района и распределении их по земельным категориям (2020) Земельный комитет Администрации Конаковского района.

Посохов, Е.В. (1985) *Ионный состав природных вод. Генезис и эволюция*, Л., Гидрометеоздат, 254 с.

Прянишников, Д.Н. (1952) *Агрохимия*. Т. 1. Избр. соч., М., Гос. Изд-во с.х. лит-ры, 691 с.

Смоляр, В.А. (2017) Прогноз изменения ресурсов подземных вод под влиянием климатических условий, *Геология и охрана недр*, № 4 (65), с. 60-66.

Титова, В.И., Варламова, Л.Д., Дабахова, Е.В., Бахарев, А.В. (2011) Изучение фосфорных удобрений и фосфатного состояния почв, *Агрохимический вестник*, № 2, с. 3-6.

Шилькрот, Г.С. (2015) О миграции фосфора и других химических элементов с грунтовым стоком в сельских ландшафтах, в кн.: *Сб. науч. трудов конф. «Научное обеспечение реализации водной стратегии РФ на период до 2020 г.»*, КНЦ РАН, с. 386-394.

Цыганов, А.А. (2019) Оценка состояния окружающей среды города Твери, *Вестник Тверского университета*. Серия «География и геоэкология», № 2 (26), с. 56-77.

Ясинский, Н.С., Даценко, Ю.С. (2018) Закономерности формирования речного стока фосфора для целей гидрологического моделирования, *Природообустройство*, № 1, с. 25-33.

Lapina, Elena, Lapina, Larisa, Kudrajshova, Vera (2021) Transformation of the groundwater composition in coastal zone of the Ivankovo reservoir during 20 years, *Engineering geology and hydrogeology*, 35. Sofia, pp. 3-14, http://igh-bg.com/Vol/vol_35.html.

References

Borevskij, B.V., Markov, M.L. (2014) YAvlyaetsya li mezhenyj raskhod rek meroj pitaniya podzemnyh vod ili obshchego podzemnogo stoka [Is river low-water flow a measure contributing to underground water or common total underground water inflow], *Razvedka i ohrana neдр*, Moscow, no. 5, pp. 10-16.

GOST 31861-2012 «Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob» (2013) [Water. General requirements for sampling], Standartinform, Moscow, Russia, 32 p.

Grinevskij, S.O., Pozdnyakov, S.P. (2017) Retrospektivnyj analiz vliyaniya klimaticheskikh izmenenij na formirovanie resursov podzemnyh vod [Retrospective analysis of the impact of climate change on the formation of groundwater resources], *Vestn. Mosk. Un-ta, ser. 4. Geologiya*, no. 2, pp. 42-51.

Ivan'kovskoe vodohranilishche: sovremennoe sostoyanie i problemy ohrany (2000) [Ivankovo Reservoir: Current State and Protection Problems], Moscow, Russia, 344 p.

Eremina, I.D. (2019) Himicheskij sostav atmosferyh osadkov v Moskve i tendencii ego mnogoletnih izmenenij [The chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-term changes], *Vestn. Mosk. Unta, ser. 5. Geografiya*, no. 3, pp. 3-10.

Kovalevskij, V.S., Fedorchenka, E.A., Klige, R.K. (1999) Vozmozhnye izmeneniya zapasov i urovnej gruntovyh vod v bassejne Volgi [Possible changes of reserves and ground water levels in the Volga river basins in accordance with the climate change], *Izvestiya AN. Seriya geograficheskaya*, no. 5, pp. 61-67.

Komissarov, A.B., Chekmareva, E.A. (2019) Ocenka kachestva snezhnogo pokrova na vodosbornoj territorii Ivan'kovskogo vodohranilishcha [Assessment of the quality of snow cover in the catchment area of the Ivankovo reservoir], *Ekologicheskij sb. 7, Trudy mol. Uchenyh, Vseros. mol. konf. Tol'yatti*, pp. 238-242, doi: 10.24411/9999-010A-2019-10059.

Korneva, L.G. (2015) *Fitoplankton vodohranilishch bassejna Volgi* [Phytoplankton of reservoirs of the Volga basin], Kostroma, Russia, 284 p.

Krasinceva, V.V., Kuz'mina, N.P., Senyavin M.M. (1977) *Formirovanie mineral'nogo sostava rechnyh vod* [Formation of the mineral composition of river waters], Moscow, Russia, 176 p.

Lapina, E.E. (2021) *Dinamika gidrohimicheskogo sostava vyrabotannyh verhovyh bolot (Tverskaya oblast')* [Hydrochemical composition dynamics of degraded bogs waters (Tver Region)], Mat-ly konf. XI Galkinskie chteniya, St. Petersburg, Russia, pp. 130- 131.

Lapina, E.E., Ahmet'eva, N.P., Kudryashova, V.V. (2014) *Rodniki doliny verhnej Volgi i ee pritokov: usloviya formirovaniya, rezhim, ohrana*, [Springs of the valley of the upper Volga and its tributaries: formation conditions, regime, protection], Tver', Russia, 256 p.

Lapina, E.E., Kudryashova, V.V. (2021) Tendencii izmeneniya himicheskogo sostava gruntovyh vod vodosbora vokrug Ivan'kovskogo vodohranilishcha, [Tendencies of groundwater quality changes around Ivankovo reservoir over 20 years], *Sovremennye problemy vodohranilishch i ih vodosborov. Trudy VII Vseros. n-pr. konf. s mezhdunar*, Perm', Russia, pp.307-311.

Lapina, L.E., Grigor'eva, I.L. (2020) Analiz izmeneniya temperatury vozduha i summy osadkov po dannym meteostancij Starica i Tver' za mnogoletnij period [Analysis of changes in air temperature and the amount of precipitation according to the data of Staritsa and Tver meteorological stations over a long period], *Vestnik TvGU, seriya "geografiya i geoekologiya"*, no. 3(31), pp.57-78, doi 10.26456/2226-7719-2020-3-59-80.

Lola, M.V., Ahmet'eva, N.P., Grigor'ev, V.T., Lahtyuk, R.A. (1988) Soderzhanie v pochvah biogennyh veshchestv i ih vliyanie na evtrofirovanie vodoema [The

content of biogenic substances in soils and their influence on the eutrophication of the reservoir], *Vodnyye resursy*, no. 6, pp. 108-116.

Novikov, Yu.V., Lastochkina, K.O., Boldina, Z.N. (1990) *Metody issledovaniy kachestva vody vodoemov*, [Methods for studying the quality of water in reservoirs], in A.P. Shickovoj (ed.), *Medicina*, Moscow, Russia, 400 p.

Mirzoev, E.S., Mirzoev, A.E. (1995) *Konakovskij rajon. Kraevedcheskij spravochnik* [Konakovsky district. local history guide], Tver', Russia, 330 p.

Modelirovanie rezhima fosfora v dolinnom vodohranilishche (1995) [Modeling of the Phosphorus Regime in a Valley Reservoir], pod red. K.K. Edel'shtejna, Moscow, Russia, 80 p.

Motuzova, G.V., Barsova, N.YU., Karpova, E.A., Kocheryan, A.G. (2009) *Sostav lizimetricheskikh vod pochv Verkhnevolzhskikh landshaftov* [Composition of lisimetric waters from soils of Upper Volga landscapes], *Pochvovedeniye*, vol. 42, no. 2, pp. 209-216.

Motuzova, G.V., Barsova, N.YU., Karpova, E.A., Kocheryan, A.G. (2010) *Formirovanie himicheskogo sostava pochvennyh vod v beregovoj zone Ivan'kovskogo vodohranilishcha* [Forming of chemical content in the coast zone of Ivankovo reservoir], *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, no. 3, pp. 109-117.

Otchet o nalichii zemel' Konakovskogo rajona i raspredelenii ih po zemel'nyh kategoriyam (2020) [Report on the availability of lands in the Konakovo district and their distribution by land categories], *Zemel'nyj komitet Administracii Konakovskogo rajona*, Russia.

Posohov, E.V. (1985) *Ionnyj sostav prirodnyh vod. Genezis i evolyuciya* [Ionic composition of natural waters]. *Genesis and evolution*, Leningrad, Russia, 254 p.

Pryanishnikov, D.N. (1952) *Agrohimiya* [Agrochemistry], vol. 1., State Publishing house agricultural liter, Moscow, Russia, 691 p.

Smolyar, V.A. (2017) *Prognoz izmeneniya resursov podzemnyh vod pod vliyaniem klimaticheskikh uslovij* [Forecast of changes in groundwater resources under the influence of climatic conditions], *Geologiya i ohrana nedr*, no. 4 (65), pp. 60-66.

Titova, V.I., Varlamov, L.D., Dabahova, E.V., Baharev, A.V. (2011) *Izuchenie fosfornyh udobrenij i fosfatnogo sostoyaniya pochv* [The study of phosphate fertilizers and the phosphate state of soils], *Agrohimicheskij vestnik*, no. 2, pp. 3-6.

SHil'krot, G.S. (2015) *O migracii fosfora i drugih himicheskikh elementov s gruntovym stokom v sel'skih landshaftah* [On the migration of phosphorus and other chemical elements with ground runoff in rural landscapes], sb. n. trudov konf., *Nauchnoe obespechenie realizacii vodnoj strategii RF na period do 2020*, pp. 386-394.

Cyganov, A.A. (2019) *Ocenka sostoyaniya okruzhayushhej sredy` goroda Tveri* [Assessment of the state of the environment of the city of Tver], *Vestnik Tverskogo*

universiteta, Seriya «Geografiya i geoe`kologiy, no. 2(26). pp. 56-77, doi.org/10.26456/2226-7719-2019-2-56-77.

Yasinskiy, N.S., Datsenko, YU.S. (2018) Zakonomernosti formirovaniya rechnogo stoka fosfora dlya tseley gidrologicheskogo modelirovaniya [Patterns of the formation of phosphorus river runoff for the purposes of hydrological modeling], *Prirodoobustroystvo*, no. 1, pp. 25-33.

Lapina, Elena, Lapina, Larisa, Kudrajshova, Vera. (2021) Transformation of the groundwater composition in coastal zone of the Ivankovo reservoir during 20 years. *Engineering geology and hydrogeology*, 35, Sofia, pp. 3-14.

Поступила в редакцию: 13.08.2022;

Доработана после рецензирования: 14.04.2023.

Для цитирования / For citation:

Лапина, Е.Е., Кудряшова, В.В., Лапина, Л.Э. (2023) Изменения химического состава грунтовых вод вокруг Иваньковского водохранилища за 20 лет, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 1-2, с.18-37, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-18-37.

Lapina, E.E., Kudryashova, V.V., Lapina, L.E (2023) Changes in the chemical composition of groundwater around the Ivankovo reservoir over 20 years, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no. 1-2, pp. 18-37, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-18-37.

Динамика сроков весеннего прилета скворца обыкновенного на Европейскую территорию России

М.С. Солдатов¹⁾, А.А. Минин²⁾, Ф.М. Коренной³⁾*

¹⁾ МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра биогеографии, Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы

²⁾ ФГБУ Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Россия, 107258, Москва, Глебовская ул., 20Б

³⁾ ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных», Россия, 600901, г. Владимир, мкр. Юрьевец

*Адрес для переписки: soldatov@biogeo.ru

Реферат. Весенние прилеты и пролеты птиц являются важными фенологическими индикаторами состояния природы регионов, поэтому изучение закономерностей этих событий дает возможность глубже понимать характер меж- и внутригодовой динамики как популяций, так и экосистем. В работе исследовалась многолетняя пространственно-временная динамика весенних сроков прилета скворца обыкновенного (*Sturnus vulgaris* L.) в центре Русской равнины за период 1976–2012 гг., по данным 41 пункта. Коэффициенты линейных трендов за весь период составили от 0.1 в северной части рассматриваемой территории (южная тайга, хвойно-широколиственные леса) до 0.3 в южной (широколиственные леса, лесостепь). Таким образом, прилеты везде становились позже, только за период 1980–1990 гг. коэффициенты были слабо отрицательными. Это противоречит тенденциям потепления климата и может быть объяснено, в частности, разрушением традиционной сельскохозяйственной инфраструктуры: резким сокращением количества мест укрытий и источников корма (конюшни, коровники сельские двory, сено- и зернохранилища и пр.), которые имеют важное значение в условиях переменчивой погоды ранней весной.

Ключевые слова. Временные ряды, даты прилета, тренды, Русская равнина.

Dynamics of the timing of the spring arrival of the common starling on the European territory of Russia

M.S. Soldatov¹⁾, A.A. Minin²⁾, F.M. Korennoy³⁾*

¹⁾ Moscow State University M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, Department of Biogeography, Leninskiye Gory, GSP-1, 119991, Moscow, Russian Federation

²⁾ Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, 20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

³⁾ FSBI "Federal Center for Animal Health",
md. Yurievets, 600901, Vladimir, Russian Federation

*Correspondence address: soldatov@biogeo.ru

Abstract. Spring arrivals and flights of birds are important phenological indicators of the state of nature of the regions. Therefore, studying the patterns of these events makes it possible to better understand the nature of inter- and intra-annual dynamics of both populations and ecosystems. The paper investigated the long-term spatial and temporal dynamics of the spring arrival dates of the common starling (*Sturnus vulgaris* L.) in the center of the Russian Plain for the period 1976-2012, according to 41 points. The coefficients of linear trends for the entire period ranged from 0.1 in the northern part of the territory under consideration (southern taiga, coniferous-deciduous forests) to 0.3 in the southern (deciduous forests, forest-steppe). Thus, arrivals everywhere became later, only for the period 1980-1990 the coefficients were slightly negative. This contradicts the trends of climate warming and can be explained, in particular, by the destruction of traditional agricultural infrastructure: a sharp reduction in the number of shelters and sources of feed (stables, cowsheds, rural yards, hay and granaries, etc.), which are important in conditions of changeable weather in early spring.

Keywords. Time series, arrival dates, trends, Russian plain.

Введение

Интерес к фенологическим наблюдениям за сезонной ритмикой экосистем многократно возрос в последние десятилетия в связи с глобальным изменением климата, тенденции которого особенно ярко выражены в Северном полушарии. Существенно повысилось внимание к многолетним рядам фенологических данных как источникам информации о межгодовой динамике состояния экосистем в связи с изменениями климата (Солдатов, 2018; Ovaskainen et al., 2020; Минин и др., 2020; Буйволов и др., 2022).

Одним из важных компонентов природных экосистем являются птицы, также реагирующие на изменения климата. Птицы – одна из наиболее многочисленных и доступных для наблюдений групп животных. Именно сезонные преобразования в жизни птиц и связанные с этим закономерности динамики численности, миграций, изменений ареалов являются одной из актуальных и интенсивно изучаемых проблем.

Принято считать, что динамика сроков весеннего прилета птиц во многом обусловлена экзогенными факторами, т.е. внешними, главным из которых является температура воздуха. Потепление способствует сдвигу фенологических явлений, в том числе весеннему прилету птиц, на более ранние сроки (Шульц, 1981; Гордиенко, Соколов, 2006; Венгеров, 2015; Соловьев, 2015; Уфимцева, 2016), хотя не у всех видов (Минин, Гутников, 2000). Эти явления требуют дальнейшего изучения, поскольку сроки весеннего прилета и размножения птиц во многом отражают сезонное развитие экосистем в целом (Фесенко и др., 1996; Венгеров, 2011).

Несомненно, наблюдения за изменением сезонных проявлений природных объектов, в частности у птиц, наиболее точно можно проводить в одном пункте, например, в заповедниках, где существует возможность обеспечить длительные (вековые) наблюдения, с привлечением квалифицированных кадров, одновременно как за объектами живой природы, так и за факторами среды, влияющими на их динамику.

Вместе с тем актуальными остаются и материалы фенологических сетей, где в каждой точке наблюдения материал собирается по единой методике и отправляется в центр для дальнейшей обработки. Таковой, в частности, является фенологическая сеть Русского географического общества (РГО), материалы календарей природы (Минин, 2000, 2015, 2022).

Цель работы заключается в исследовании многолетней пространственно-временной динамики весенних сроков прилета скворца обыкновенного (*Sturnus vulgaris* L.) в аспекте климатических флуктуаций в центре Русской равнины за период 1976-2012 гг.

Материалы и методы

Основанием для данной работы послужили данные о сроках прилета перелетных скворцов фенологической сети РГО за 1976-2012 гг., включающие 41 наблюдательный пункт, расположенные в центре европейской территории России (ЕТР), от Воронежской области на юге, до Вологодской на севере, от лесостепи до южной тайги.

Как видно из рис. 1, наибольшее число наблюдательных пунктов расположено в широколиственно-лесостепном биоме, на юге исследуемой территории; наименьшее – в южно-таежном биоме.

Для выявления статистически значимых закономерностей изменения сроков прилета скворцов для каждого пункта наблюдений был применен метод группировки и последующего анализа пространственно-временных данных «пространственно-временной куб». Данный подход рассматривает временные ряды данных, привязанные к локациям наблюдений, причем время представлено в качестве вертикального измерения. Анализируемой величиной явилась дата прилетов.

В качестве локаций наблюдения использовались полигоны Тиссена, построенные вокруг соответствующих пунктов наблюдения. Для выявления локаций со сходной временной динамикой прилетов был применен метод кластеризации временных рядов, основанный на поиске групп локаций, в которых временные ряды более схожи между собой, чем с рядами в других группах. Анализ кластеризации был выполнен на основе метода К-средних.

Для каждой из выявленных групп (кластеров) анализировалась усредненная динамика и выявлен ее тренд на основе статистики Манна-Кендалла (Kendall&Gibbons, 1990; Nared, 2009). Статистика Манна-Кендалла представляет собой метод ранговой корреляции, основанный на сопоставлении последующего и предыдущего значений внутри временного ряда. Положительные значения статистики Манна-Кендалла при малых значениях p -value

указывают на статистически значимый возрастающий тренд, отрицательные значения – на убывающий тренд.



Рисунок 1. Расположение пунктов наблюдения за прилетами скворцов на Русской равнине
Биомы: I – Днепровско-Приволжский широколиственный и лесостепной; II – Смоленско-Приволжский широколиственно-хвойный; III – Прибалтийско-бореальный, южно-таежный
Ветлужский (Огуреева и др., 2015)

Figure 1. Location of the observation points for the arrival of starlings on the Russian Plain
Biomes: I – Dnieper-Volga broad-leaved and forest-steppe; II – Smolensk-Volga broad-leaved
coniferous; III – Baltic-boreal, south taiga Vetluzhsky (Ogureeva et al., 2015)

Результаты и обсуждение

В фенологических исследованиях весенние события традиционно фиксируются в днях от первого марта, начала календарной весны. Появление ранне-прилетных птиц, как правило, совпадает с наступлением фенологической весны – появлением первых проталин на освещенных солнцем местах. Развитие весенней ситуации на Русской равнине происходит с юго-запада на северо-восток: зарождающиеся на юго-западе весенние явления распространяются на северо-восток с последующим отклонением фронта сезонных явлений к северу (Шульц, 1981). Примерно таким же образом, происходит и миграция раннеприлетных птиц на ЕТР (рис. 2).

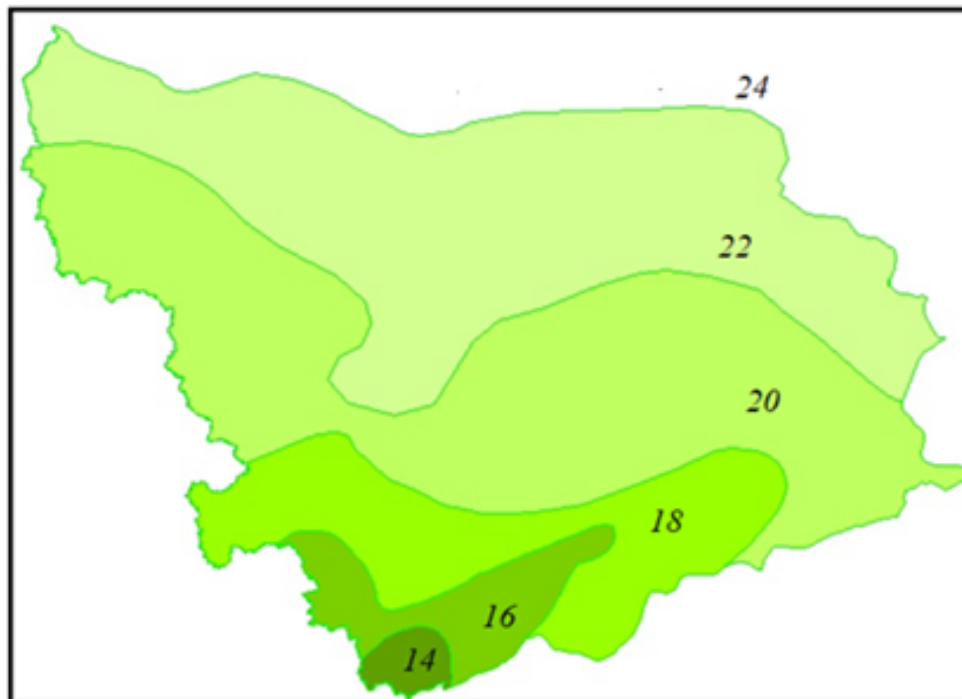


Рисунок 2. Средние даты весеннего прилета обыкновенного скворца на центральную часть ЕТР, в днях от 1 марта, за 1976-2012 гг.

Figure 2. Average dates of the spring arrival of the common starling to the central part of the ETR, in days from March 1, for 1976-2012

На рис. 2 видно, что наиболее ранние даты прилетов отмечены в пунктах наблюдений, расположенных в лесостепной части Днепроовско-Приволжского биома (14, 16, 18 дней); наиболее поздние – 24 дня и более, отмечены на севере исследуемой территории, в южно-таежном биоме.

Коэффициенты линейного тренда (рис. 3) за весь рассматриваемый период составили от 0.1 в северной части рассматриваемой территории (южная тайга, хвойно-широколиственные леса) до 0.3 в южной (широколиственные леса, лесостепь). Таким образом, прилеты везде стали происходить позже, только за период 1980-1990 гг. коэффициенты были слабо отрицательными. Этот вывод противоречит ожиданиям, что миграции раннеприлетных птиц к местам гнездования под влиянием потепления климата должны иметь четкую тенденцию к более ранним прилетам.

В нашем анализе выявляются две группы локаций, в которых изменение сроков прилета скворцов носят сходный характер (рис. 4): северная со значением статистики Манна-Кендалла 1.4458 ($p=0.1482$) и южная со значением 1.8385 ($p=0.0660$). Можно сделать вывод, что южная группа локаций демонстрирует статистически значимый тренд к более позднему прилету скворцов (рис. 5).

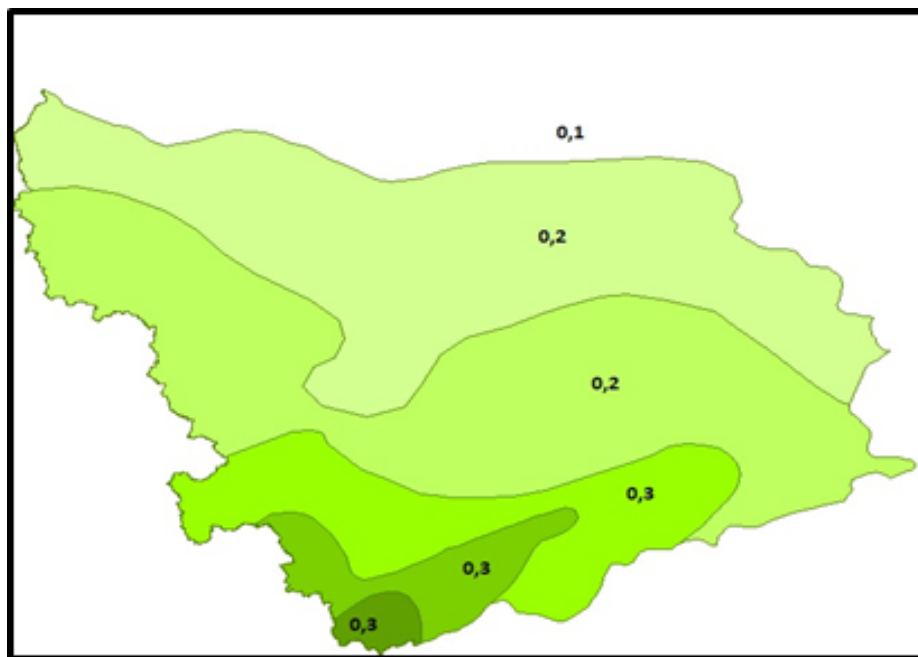


Рисунок 3. Средние значения коэффициента линейного тренда по датам прилета скворцов
Figure 3. Average values of the linear trend coefficient by the arrival dates of starlings

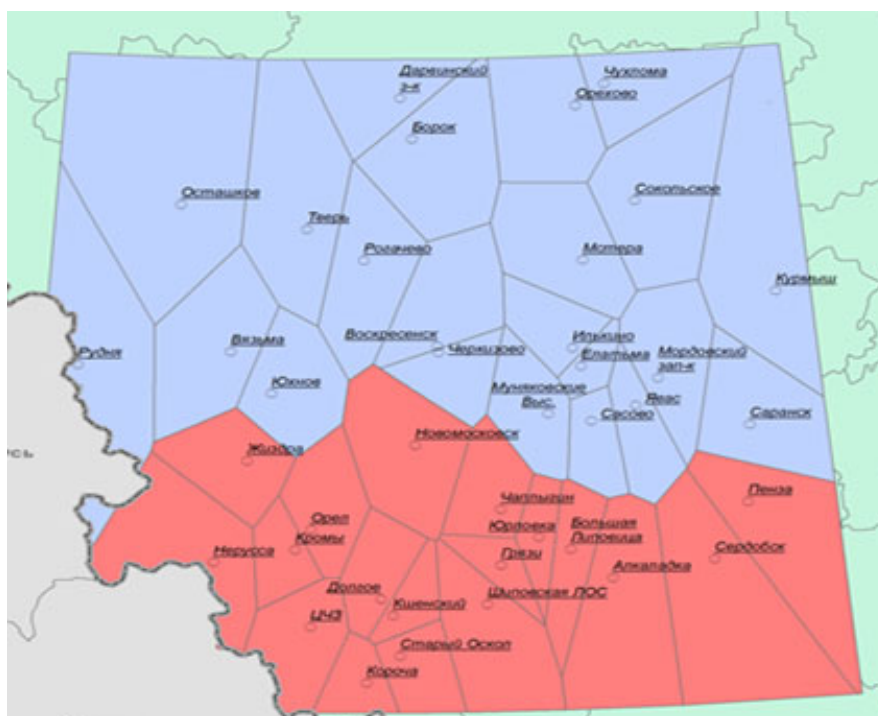


Рисунок 4. Кластеры временных серий за период 1976-2005 гг.
Figure 4. Clusters of time series for the period 1976-2005

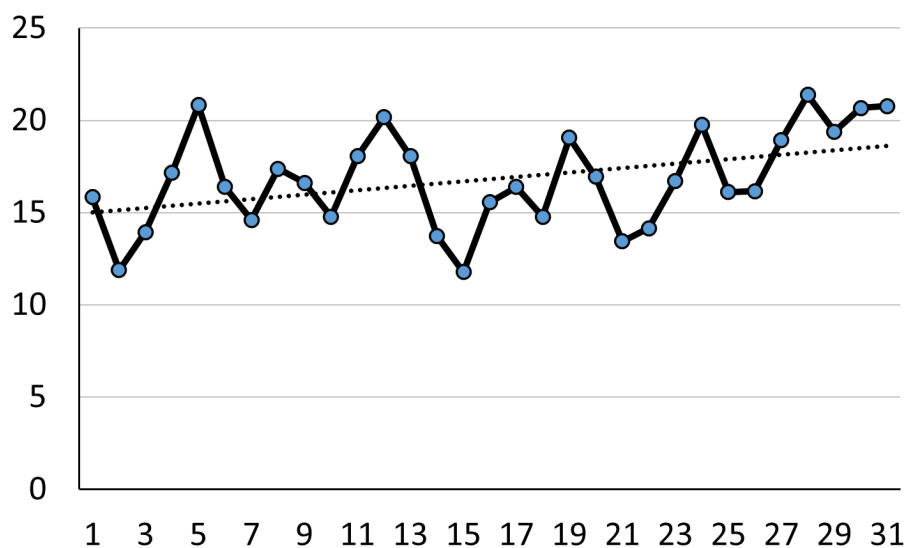


Рисунок 5. Временной ряд дат прилета скворцов в южный регион за период 1976-2005 гг.
по оси X – дни от 1 марта; по оси Y – годы за период

Figure 5. Time series of dates of arrival of starlings in the southern region for the period 1976-2005
along the X axis – days from March 1; along the Y axis – years for the period

Для северной группы пунктов наблюдений нарастающий тренд не является статистически значимым. Таким образом, по данным наблюдений в северном регионе, не выявлено направленных изменений сроков прилета скворцов, в связи с чем можно утверждать, что, несмотря на значительную динамику дат прилетов, в целом время прилетов в данные пункты не изменилось.

Анализ временного ряда дат прилетов скворцов (рис. 5) показал, что амплитуда сроков прилетов между самым ранним и наиболее поздним временем прилетов составляет 10 суток. Следует отметить, что, согласно проведенным ранее расчетам, межгодовая изменчивость дат прилетов скворцов в данный регион за среднестатистический период 20 лет составила 20-25 дней (Минин, 1992). Средняя дата прилета за рассматриваемый период – 17 марта. Один из самых поздних прилетов скворцов наблюдался весной 1980 г. – 21 марта. Это было обусловлено крайне холодной и снежной зимой 1979-1980 гг. и затяжной, холодной весной. За последующее десятилетие по 1990 г. включительно в целом наблюдался период более ранних прилетов. Далее в 1991-2005 гг. заметен относительно устойчивое смещение сроков прилетов на эту территорию на более поздние сроки.

В связи с этим обстоятельством были рассчитаны линейные тренды дат прилетов скворцов для всех южных пунктов наблюдений для двух периодов 1980-1990 гг. и 1991-2012 гг., а также за все время наблюдений с 1976 по 2012 гг. (табл. 1).

Таблица 1. Показатели линейного тренда дат прилетов скворцов в пункты наблюдения в южном регионе

Table 1. Indicators of the linear trend of the dates of starling arrivals to observation points in the southern region

Населенный пункт	Тренд (дни) 1976-2012	Коэффициент детерминации, R^2	Тренд (дни) 1980-1990	Коэффициент детерминации, R^2	Тренд (дни) 1991-2012	Коэффициент детерминации, R^2
дер. Алкаладка	9.7	0.211	-3.7	0.138	11.9	0.2338
с. Большая Липовица	18.9	0.4701	-3.6	0.1271	23.5	0.5769
пгт. Грязи	9.4	0.1782	-2.0	0.0451	9.4	0.1262
с. Долгое	13.3	0.5666	-3.4	0.0967	17.2	0.8989
гп. Жиздра	8.5	0.4288	-2.6	0.0876	10.7	0.6273
гп. Короча	11.9	0.4287	-1.6	0.017	15.5	0.6208
пгт. Кромы	9.0	0.4331	-2.6	0.0901	12.6	0.7627
п. Кшенский	11.6	0.5033	-3.0	0.0765	16.6	0.8469
Шиповская ЛОС	1.9	0.0545	-3.1	0.111	2.5	0.1312
п. Нерусса	10.7	0.4257	-3.9	0.1073	15.6	0.8477
г. Новомосковск	23.1	0.4199	-6.2	0.2636	31.0	0.5749
г. Орел	8.8	0.4038	-5.6	0.3161	11.9	0.7323
г. Пенза	8.5	0.4142	-5.5	0.3593	9.0	0.4745
г. Сердобск	19.4	0.3644	-4.2	0.1982	24.7	0.4331
г. Старый Оскол	22.7	0.361	-2.2	0.0341	29.2	0.4371
ЦЧЗ	14.1	0.3977	-4.1	0.161	16.2	0.431
г. Чаплыгин	22.5	0.3005	-5.5	0.2859	31.3	0.4141
с. Юрловка	5.3	0.2145	-6.2	0.3606	6.7	0.3949

В табл. 1 наглядно показано, что тенденции сроков прилета за весь период наблюдений 1976-2012 гг. имеют положительный характер с выраженным смещением дат на более поздние сроки. Максимальное смещение отмечено в Новомосковске (23.1 дней), наименьшее в ЛОС (+1.9 дней). Величина коэффициента детерминации относительно высокая, хотя и недостаточная ($R^2 < 0.6$), при том, что линии тренда хорошо отражают явное повышение значений для всех пунктов наблюдений.

Тенденции сроков прилета за период наблюдений 1980-1990 гг. (11 лет) отличается от остальных периодов отрицательной направленностью для всех пунктов наблюдений, что свидетельствует о том, что скворцы в этот период прилетали раньше. Наибольший тренд прилета скворцов отмечен в с. Юрловка (-6.2 дней), наименьший в гп. Короча (-1.6). Несмотря на незначительную величину коэффициента детерминации, R^2 , линия тренда хорошо выражает явное понижение значений в большинстве пунктов со временем.

Период 1991-2012 гг. характеризуется устойчивой положительной тенденцией с выраженным смещением дат на более поздние сроки. Максимально высокий тренд отмечен в Чаплыгине – +31.3, минимальный в ЛОС (+2.5). Коэффициенты аппроксимации имеют высокие и достаточные величины, превышающие значение 0.6.

Таким образом, положительные тенденции сроков прилетов скворцов на территорию широколиственного и лесостепного биома обеспечиваются по преимуществу статистикой прилетов в период 1991-2012 гг., т.е. за 22 года из всех 37 лет наблюдений. Подобная цикличность, видимо, вообще характерна для мигрирующих птиц (Соловьев, 2015). Большинство авторов связывают ее с колебанием климатических факторов – температурой воздуха, наличием снежного покрова, появлением проталин и т.д.

Северная группа локаций не дала статистически значимого общего тренда. Однако, это не значит, что недостоверны результаты каждого из кластеров. В связи с этим имеет смысл подробнее рассмотреть динамику сроков прилета птиц для каждого пункта наблюдений. Результаты статистических расчетов представлены в табл. 2. В целом тренды данной группы схожи с показателями южной группы (табл. 1). Иными словами, временные ряды за весь период наблюдений показывают преимущественно положительные значения. Однако в трех пунктах – дер. Осташково, с. Рогачево и г. Тверь, тренды незначительны, т. е. за весь период наблюдений время прилетов скворцов в этих пунктах мало изменилось. За период 1980-1990 гг. тренды имеют устойчивые отрицательные значения, что соответствует данным по южной группе (см. табл. 1).

Период 1991-2012 гг. характеризуется в целом более поздними срокам прилетов скворцов, что отражают положительные значения трендов. Исключение составляют тренды для уже упомянутых трех населенных пунктов (г. Тверь, дер. Осташково, с. Рогачево), где показатели трендов низкие и отрицательные, а также данные для Дарвинского заповедника, которые показывают, что существенных изменений в прилетах скворцов за это время не произошло.

Для более подробного анализа весь массив данных северных пунктов наблюдений был разбит на три группы в соответствии с их расположением в системе биомов (табл. 2). Широколиственному биому соответствует группа из восьми населенных пунктов (Елатьма-Курмыш). Они расположены на агропромышленных территориях, представленных в основном открытыми пространствами. Коэффициенты аппроксимации данной группы имеют по преимуществу относительно высокие значения.

Таблица 2. Показатели линейного тренда дат прилетов скворцов в пункты наблюдения в северном регионе

Table 2. Indicators of the linear trend of the dates of arrivals of starlings at observation points in the northern region

Населенный пункт	Тренд (дни) 1976-2012	Коэффициент детерминации, R^2	Тренд (дни) 1980-1990	Коэффициент детерминации, R^2	Тренд (дни) 1991-2012	Коэффициент детерминации, R^2
г. Елатьма	7.8	0.3758	-6.3	0.2574	7.4	0.5345
с. Илькино	7.3	0.3931	-6.7	0.4074	7.9	0.5444
г. Сасово	7.0	0.3661	-3.3	0.1762	6.5	0.5064
г. Саранск	5.3	0.3425	-3.8	0.1587	5.3	0.4813
п. Мордвес	12.8	0.3752	-7.0	0.2734	14.5	0.4374
п. Муняков-сковсие выселки	12.5	0.2999	-2.8	0.0715	14.2	0.308
п. Явас	7.3	0.4661	-2.2	0.067	5.4	0.3741
дер. Курмыш	4.6	0.1949	-7.1	0.554	4.4	0.2436
г. Воскресенск	5.2	0.1962	-5.5	0.2244	6.3	0.4339
п. Мстера	7.6	0.2288	-8.0	0.4734	9.2	0.3012
с. Черкизово	3.6	0.0975	-6.5	0.2744	5.3	0.2911
пгт. Сокольское	6.4	0.149	-9.3	0.5516	9.0	0.2454
г. Вязьма	3.8	0.1265	-4.6	0.1906	3.7	0.2373
г. Тверь	1.6	0.0159	-2.7	0.0408	-0.6	0.0408
г. Юхнов	4.8	0.0726	-4.6	0.2501	6.1	0.0835
дер. Осташково	-0.8	0.0014	-5.4	0.1092	-2.5	0.0728
с. Рогачево	0.8	0.0091	-3.3	0.1113	-1.7	0.0304
гп. Рудня	2.7	0.0303	-2.7	0.061	2.0	0.0147
дер. Орехово	12.0	0.4318	-6.4	0.3336	15.0	0.6336
гп. Чухлома	11.9	0.3473	-8.0	0.3666	16.4	0.5984
с. Борок	7.5	0.1187	-3.2	0.035	7.3	0.1041
Дарвинский заповедник	2.7	0.0304	-3.6	0.0479	0.7	0.0033

Вторая группа включает 10 населенных пунктов (Воскресенск-Рудня). Все они расположены в пределах хвойно-широколиственного биома. Эта территория наиболее плотно населенная, имеет развитое сельское хозяйство и промышленность и, по сути, характеризуется наиболее измененной окружающей

средой. Тренды данной группы отличаются относительно невысокими значениями коэффициента аппроксимации. Именно к этой группе относятся упомянутые выше три пункта наблюдения, для которых не выявлено выраженных трендов.

Третья группа включает четыре населенных пункта, которые расположены на территории южно-таежного биома, где относительно небольшие по размеру сельхозугодья окружены обширными массивами хвойных лесов. Временные ряды для дер. Орехово и гп. Чухлома показывают высокие положительные значения трендов как за весь период наблюдений, так и за период 1991-2012 гг., имеют высокие коэффициенты аппроксимации. Средние значения трендов характерны для временного ряда с. Борок. Низкие показатели трендов выявлены для Дарвинского заповедника.

Таким образом, недостаточная значимость общего для северной группы локаций тренда обусловлена низкими показателями трендов, характерных преимущественно для второй группы пунктов наблюдения, расположенных в биоме смешанных лесов.

Однако, стоит отметить, что в этот период продолжалась начатая в 1960-1970 гг. практика ликвидации «неперспективных» деревень с негативными изменениями на традиционных сельскохозяйственных территориях – появлением большего числа заброшенных, ранее обрабатываемых полей, зарастание полей мелколесьем, переводом крупного рогатого скота на стойловое содержание и т.д. Традиционная сельскохозяйственная инфраструктура сильно изменилась: исчезли тысячи деревень и дворов с хлевами, курятниками, сеновалами, и пр., резко сократилось количество коровников, конюшен, хранилищ зерна и сена. Для раннеприлетных птиц очень важно наличие корма и мест укрытий от неблагоприятных явлений, которые обычны ранней весной. И эти объекты предоставляли такую возможность. Вероятно, в рассматриваемое время у скворцов реализуется начатая ранее тенденция на прилет «наверняка», когда погодные условия в местах прилетов стабилизируются.

Заключение

Анализ рядов данных о сроках весеннего прилета скворцов в центральную часть ЕТР за период 1976-2012 гг. показал, что в целом в эти годы доминирует тенденция задержки появления птиц в местах гнездований несмотря на наблюдаемое потепление климата в регионе. Одной из вероятных причин может стать разрушение традиционной сельскохозяйственной инфраструктуры и обусловленное этим исчезновение мест укрытий от неблагоприятных погодных условий ранней весной и источников корма.

Список литературы

Буйволов, Ю.А., Минин, А.А., Черногаева, Г.М. (2022) Летопись природы – вызовы и возможности, *Использование и охрана природных ресурсов в России*, т. 33, № 1-2, с. 5-19.

Венгеров, П.Д. (2015) Сроки весеннего прилета птиц в Воронежском заповеднике на фоне длительных климатических изменений, *Серия Естественные науки*, № 3 (200), вып. 30, с. 82-92.

Венгеров, П.Д. (2011) Влияние изменений климата на сроки прилета и размножения певчего дрозда (*Turdus philomelos*) и зяблика (*Fringilla coelebs*) в Воронежском заповеднике, *Успехи современной биологии*, т. 131 (4), с. 416-424.

Гордиенко, Н.С., Соколов, Л.В. (2006) Долговременные изменения сроков прилета птиц в Ильменский заповедник, *Известия Челябинского научного центра*, вып. 3(33), с. 82-86.

Минин, А.А. (1992) Пространственно-временная изменчивость дат начала некоторых феноявлений у птиц на Русской равнине, *Бюллетень МОИП. Отд. Биологии*, т. 97, вып. 5, с. 28-34.

Минин, А.А. (2015) Добровольная фенологическая сеть РГО: состояние, перспективы, материалы, *Современное состояние фенологии и перспективы ее развития*, Екатеринбург, ФГБОУ ВПО Урал, т. 1, с. 121-129.

Минин, А.А. (2022) История и материалы фенологических наблюдений Московского центра Русского географического общества, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXIII, № 1-2, с. 5-19, doi: 10.21513/0207-2564-2022-1-2-5-19.

Минин, А.А., Ананин, А.А., Буйволов, Ю.А., Ларин, Е.Г., Лебедев, П.А., Поликарпова, Н.В., Прокошева, И.В., Руденко, М.И., Сапельникова, И.И., Федотова, В.Г., Шуйская, Е.А., Яковлева, М.В., Янцер, О.В. (2020) Рекомендации по унификации фенологических наблюдений в России, *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, т. 5(4), с. 89-110, электронный ресурс, URL: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2020.060>.

Минин, А.А., Гутников, В.А. (2000) Феноиндикация современных вариаций климата в европейской части России на примере некоторых лесообразователей и птиц, *Лесоведение*, № 2, с. 68-74.

Огуреева, Г.Н., Леонова, Н.Б., Емельянова, Л.Г., Булдакова, Е.В., Кадетов, Н.Г., Архипова, М.В., Микляева, И.М., Бочарников, М.В., Дудов, С.В., Игнатова, Е.А., Игнатов, М.С., Мучник, Е.Э., Урбанавичюс, Г.П., Даниленко, А.К., Румянцев, В.Ю., Леонтьева, О.А., Романов, А.А., Константинов, П.И. (2015) *Карта «Биомы России»*, (М. 1:7500000) М., ООО Финансовый и организационный консалтинг, 8 с.

Солдатов, М.С. (2018) Изменение сроков начала цветения растений аллергенов в весенний период, *Актуальные вопросы биогеографии*, СПб., Санкт-Петербургский государственный университет, с. 387-389.

Соловьев, А.Н. (2015) Вековая динамика сроков сезонных миграций птиц в средних широтах Европейского Востока, *Бюллетень МОИП, сер. Биологическая*, т. 120, вып. 1, с. 3-17.

Уфимцева А.А. (2016) Долговременная изменчивость сроков прилета и отлета серой славки (*Sylvia communis*) и зяблика (*Fringilla coelebs*) в юго-восточное Приладожье, *Принципы экологии*, № 4, с. 42-48, электронный ресурс, URL: <http://есорпг.ру>.

Фесенко, Г.В., Михалевич, О.А., Кныш, Н.П. (1996) Соответствуют ли сроки весеннего прилета птиц сезонному развитию экосистем, *Вестник зоологии*, № 4-5, с. 36-45.

Шульц Г.Э. (1981) *Общая фенология*, Л., Наука, 188 с.

Kendall, M., Gibbons, J.D. (1990) *Rank Correlation Methods*, 5th Edition, Edward Arnold, Oxford University Press, London, 280 p.

Hamed, K.H. (2009) Exact Distribution of the Mann-Kendall Trend Test Statistic for Persistent Data, *Journal of Hydrology*, vol. 365, pp. 86-94, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.024>.

Ovaskainen, O., Meyke, E., Lo, C. et al. (2020) Chronicles of nature calendar, a long-term and large-scale multitaxon database on phenology, *Scientific Data*, vol. 7(47), pp. 1-11, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0376-z>.

References

Bujvolov, Yu.A., Minin, A.A., Chernogaeva, G.M. (2022) Letopis' prirody – vyzovy i vozmozhnosti [Chronicle of Nature – challenges and opportunities], *Ispol'zovanie i ohrana prirodnih resursov v Rossii*, vol. 33, no. 1-2, pp. 5-19.

Vengerov, P.D. (2015) Sroki vesennego prileta ptic v Voronezhskom zapovednike na fone dlitel'nyh klimaticheskikh izmenenij [The timing of the spring arrival of birds in the Voronezh Reserve against the backdrop of long-term climate change], *Seriya Estestvennye nauki*, no. 3 (200), issue 30, pp. 82-92.

Vengerov, P.D. (2011) Vliyanie izmenenij klimata na sroki prileta i razmnozheniya pevchego drozda (*Turdus philomelos*) i zyablika (*Fringilla coelebs*) v Voronezhskom zapovednike [Impact of climate change on the timing of arrival and reproduction of the song thrush (*Turdus philomelos*) and chaffinch (*Fringilla coelebs*) in the Voronezh Reserve], *Uspekhi sovremennoj biologii*, vol. 131 (4), pp. 416-424.

Gordienko, N.S., Sokolov, L.V. (2006) Dolgovremennyye izmeneniya srokov prileta ptic v Il'menskij zapovednik [Long-term changes in the timing of bird arrivals in the Ilmensky Reserve], *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra*, issue 3(33), pp. 82-86.

Minin, A.A. (1992) Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' dat nachala nekotoryh fenoyavlenij u ptic na Russkoj ravnine [Spatial-temporal variability of the dates of the beginning of some phenomena in birds on the Russian Plain], *Byulleten' MOIP, otd. Biologii*, vol. 97, no. 5, pp. 28-34.

Minin, A.A. (2015) Dobrovol'naya fenologicheskaya set' RGO: sostoyanie, perspektivy, materialy [Voluntary phenological network of RGS: state, prospects,

materials], *Sovremennoe sostoyanie fenologii i perspektivy ee razvitiya*, vol. 1, Ekaterinburg, Russia, pp. 121-129.

Minin, A.A. (2022) Istoriya i materialy fenologicheskikh nablyudenij Moskovskogo centra Russkogo geograficheskogo obshchestva [History and materials of phenological observations of the Moscow Center of the Russian Geographical Society], *Ekologicheskij monitoring i modelirovanie ekosistem*, vol. XXIII, no. 1-2, pp. 5-19, doi: 10.21513/0207-2564-2022-1-2-5-19.

Minin, A.A., Ananin, A.A., Bujvolov, Yu.A., Larin, E.G., Lebedev, P.A., Polikarpova, N.V., Prokosheva, I.V., Rudenko, M.I., Sapel'nikova, I.I., Fedotova, V.G., Shujskaya, E.A., Yakovleva, M.V., Yancer, O.V. (2020) Rekomendacii po unifikacii fenologicheskikh nablyudenij v Rossii [Recommendations for the unification of phenological observations in Russia], *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*, vol. 5(4), pp. 89-110, available at: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2020.060>.

Minin, A.A., Gutnikov, V.A. (2000) Fenoindikaciya sovremennykh variacij klimata v evropejskoj chasti Rossii na primere nekotorykh lesoobrazovatelej i ptic [Phenoindication of modern climate variations in the European part of Russia on the example of some forest forming species and birds], *Lesovedenie*, no. 2, pp. 68-74.

Ogureeva, G.N., Leonova, N.B., Emel'yanova, L.G., Buldakova, E.V., Kadetov, N.G., Arhipova, M.V., Miklyaeva, I.M., Bocharnikov, M.V., Dudov, S.V., Ignatova, E.A., Ignatov, M.S., Muchnik, E.E., Urbanavichyus, G.P., Danilenko, A.K., Rumyanecv, V.Yu., Leont'eva, O.A., Romanov, A.A., Konstantinov, P.I. (2015) *Karta «Biomy Rossii»* [Map "Biomes of Russia"], 1:7500000, ООО Finansovyy i organizacionnyj konsalting, Moscow, Russia, 8 p.

Soldatov, M.S. (2018) Izmenenie srokov nachala cveteniya rastenij allergenov v vesennij period [Change in the timing of the beginning of flowering of allergen plants in the spring], *Aktual'nye voprosy biogeografii*, Sankt-Peterburgskij Gosudarstvennyj Universitet, St. Petersburg, pp. 387-389.

Solov'ev, A.N. (2015) Vekovaya dinamika srokov sezonnykh migracij ptic v srednih shirotah Evropejskogo Vostoka [Secular dynamics of the timing of seasonal bird migrations in the middle latitudes of the European East], *Byulleten' MOIP, ser. Biologicheskaya*, vol. 120, issue 1, pp. 3-17.

Ufimceva A.A. (2016) Dolgovremennaya izmenchivost' srokov prileta i otleta seroj slavki (*Sylvia communis*) i zyablika (*Fringilla coelebs*) v yugo-vostochnoe Priladozh'e, Principy ekologii [Long-term variability of arrival and departure dates of gray warbler (*Sylvia communis*) and finch (*Fringilla coelebs*) in the southeastern Ladoga region], *Principy ekologii*, no. 4, pp. 42-48, available at: <http://ecopri.ru>.

Fesenko, G.V., Mihalevich, O.A., Knysh, N.P. (1996) Sootvetstvuyut li sroki vesennego prileta ptic sezonnomu razvitiyu ekosistem [Do the timing of the spring arrival of birds correspond to the seasonal development of ecosystems], *Vestnik zoologii*, no. 4-5, pp. 36-45.

Shul'c, G.E. (1981) *Obshchaya fenologiya* [General phenology], Nauka, Leningrad, Russia, 188 p.

Kendall, M., Gibbons, J.D. (1990) *Rank Correlation Methods*, 5th Edition, Edward Arnold, Oxford University Press, London, 280 p.

Hamed, K.H. (2009) Exact Distribution of the Mann-Kendall Trend Test Statistic for Persistent Data, *Journal of Hydrology*, vol. 365, pp. 86-94, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.024>.

Ovaskainen, O., Meyke, E., Lo, C. et al. (2020) Chronicles of nature calendar, a long-term and large-scale multitaxon database on phenology, *Scientific Data*, vol. 7(47), pp. 1-11, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0376-z>.

Поступила в редакцию: 13.02.2023 г.

Доработана после рецензирования: 20.03.2023 г.

Для цитирования / For citation:

Солдатов, М.С., Минин, А.А., Коренной, Ф.М. (2023) Динамика сроков весеннего прилета скворца обыкновенного на Европейскую территорию России, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 1-2, с. 38-52, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-38-52.

Soldatov, M.C., Minin, A.A., Korennoy, F.M. (2023) Dynamics of the timing of the spring arrival of the common starling on the European territory of Russia, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no. 1-2, pp. 38-52, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-38-52.

Влияние климатических изменений на сроки начала цветения черемухи обыкновенной на Урале в XX-XXI веке

О.В. Янцер*, Н.А. Лантнев

Уральский государственный педагогический университет,
Россия, 620019, Свердловская обл., г. Екатеринбург, пр. Космонавтов, 26

Адрес для переписки: *ksenia_yantser@bk.ru

Реферат. Изучение реакции растений на современные климатические изменения актуально и значимо. Растительность горных территорий характеризуется наиболее существенным и неоднозначным откликом на изменение гидротермического режима во времени. В статье проанализированы материалы существенного массива первичных данных, собранных в пределах опорных пунктов и ключевых участков Урала, Предуралья и Зауралья наблюдателями Уральского общества любителей естествознания (УОЛЕ), фенологической комиссии Всесоюзного географического общества, фенологической сети Русского географического общества. Используются данные Летописей природы заповедников Урала: Басеги, Башкирского, Висимского, Вишерского, Денежкин камень, Ильменского, Печоро-Илычского, Южно-Уральского, Шульган-Таш, Шайтан-Тау и Оренбургского по периодам относительных потеплений (1910-1945 гг.; 1976-2021 гг.) и похолодания (1946-1975 гг.). Физиологичным геосистемным феноиндикатором нарастания весенних температур воздуха и почвы, просыхания почвы, служит зацветание черемухи обыкновенной *Padusavium* Mill.; результаты изучения трендов изменения сроков начала явления представлены для ландшафтных провинций Северного, Среднего и Южного Урала. Динамическое картографирование пространственных данных в более чем 500 пунктах фенологической сети Урала и сопредельных территорий для климатических периодов XX-XXI вв. проведено в кроссплатформенной геоинформационной системе QGisDesktop. В большинстве пунктов наблюдений установлена линейная взаимосвязь между периодами потеплений и началом явления. Внутри провинций иногда наблюдаются довольно сильные различия в откликах вида на климатические изменения: не везде общая тенденция потепления или похолодания вызывает однозначную реакцию вида. В границах ландшафтных провинций средние многолетние даты начала цветения черемухи по периодам волн потеплений и похолодания сдвигаются на 3-4 суток, достигая максимума в 13 суток между потеплением начала-середины XX века и слабым похолоданием середины - второй трети XX века в Восточной предгорно-среднегорной провинции Южного Урала. Сроки начала цветения черемухи между крайними северными и южными пунктами в ландшафтных провинциях максимально различаются в период похолодания, достигая 33 суток. Весеннее генеративное развитие вида максимально подвержено влиянию рельефа в периоды потепле-

ний. В эти же сроки между ландшафтными областями с юга на север продвижение фронта начала цветения черемухи происходит более быстрыми темпами.

Ключевые слова. Феноиндикатор, сезонная динамика, ландшафтная провинция, черемуха, изменение климата, Урал.

The influence of climatic changes on the timing of the beginning changes of flowering of common cherry in the Urals in the XX-XXI century

O.V. Yantser, N.A. Laptev*

Ural State Pedagogical University,
26, Kosmonavtov Ave, 620019, Sverdlovsk region, Yekaterinburg, Russian Federation

Correspondence address: *ksenia_yantser@bk.ru

Annotation. The study of the reaction of plants to modern climatic changes is relevant and significant. The vegetation of mountainous territories is characterized by the most significant and ambiguous response to changes in the hydrothermal regime over time. The article analyzes the materials of a substantial array of primary data collected within the strongholds and key areas of the Urals, the Urals and the Trans-Urals by the observers of the Ural Society of Lovers of Natural Science (UOLE), the Phenological Commission of the All-Union Geographical Society, the phenological network of the Russian Geographical Society. The data of the Chronicles of nature reserves of the Urals were used: Basegi, Bashkir, Visim, Vishersky, Denezhkin Kamen, Ilmen, Pechora-Ilych, South Ural, Shulgan-Tash, Shaitan-Tau and Orenburg by periods of relative warming (1910-1945; 1976-2021) and cooling (1946-1975). The physiological geosystem phenomenon indicator of the increase in spring air and soil temperatures, drying of the soil, is the flowering of the common bird cherry *Padusavium* Mill., the results of the study of trends in the timing of the onset of the phenomenon are presented for the landscape provinces of the Northern, Middle and Southern Urals. Dynamic mapping of spatial data in more than 500 points of the geological network of the Urals and adjacent territories for climatic periods of the XX-XXI centuries was carried out in the cross-platform geoinformation system QGISDesktop. In most observation points, a linear relationship has been established between the periods of warming and the onset of the phenomenon. Within provinces, there are sometimes quite significant differences in the responses of a species to climate change: not everywhere the general trend of warming or cooling causes an unambiguous reaction of the species. Within the borders of the land-shaft provinces, the average long-term dates of the beginning of cherry blossoms in the periods of waves of warming and cooling shift by 3-4 days, reaching a maximum of 13 days between the warming of the early-mid XX century and a slight cooling of the middle-second third of the XX century in the Eastern foothill-mid-mountain province of the Southern Urals. The timing of the beginning of cherry blossoms between the extreme northern and southern points in

the landscape provinces differ as much as possible during the cold snap, reaching 33 days. The spring generative development of the species is maximally affected by the relief during periods of warming. At the same time, between landscape areas from south to north, the advance of the front of the beginning of cherry blossoms occurs at a faster pace.

Keywords. Phenoinicator, seasonal dynamics, landscape province, bird cherry, climate change, Ural.

Введение

Согласно опубликованным данным Росгидромета (Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата ..., 2014), за период 1976-2017 гг., средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории Российской Федерации составила $0.46^{\circ}\text{C}/10$ лет, что в 2.5 раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период. При этом, скорости и тенденции изменения климатических показателей в отдельных регионах, и особенно в горных территориях, отличаются от общих. Климатические изменения в настоящее время представляют собой комплексную проблему, в связи с чем одним из актуальных направлений исследований последних лет стало изучение реакции растений на колебания климата. Потепление климата вероятно скажется на сроках важных сезонных событий в жизни растений, таких как начало цветения, от которого зависят многие процессы в жизни растений (образование плодов, рассеивание семян и т.п.) и животных, для которых пыльца и нектар являются источниками пищи. Наиболее значимыми становятся долгосрочные исследования по программам многолетних фенологических наблюдений. Их результаты нередко индицируют наблюдаемые тенденции в современном потеплении климата. Зачастую, более ранние даты весенних фенологических явлений фиксируются вслед за повышением температуры среды. Однако, данная тенденция свойственна не всем видам и природным комплексам (Минин, Воскова, 2014; Минин и др., 2014). Наиболее существенным и неоднозначным откликом на влияние климатических изменений характеризуется растительность горных территорий. Фенологической сетью Русского Географического Общества (РГО) на протяжении XX-XXI вв. реализовывалась программа наблюдений за сезонными явлениями природы, благодаря чему в его архивах находится огромный массив данных (<https://fenolog.rgo.ru/>), ставший базой настоящего исследования.

Ландшафтная структура территории Урала представляет собой развивающуюся полимасштабную систему, сформированную за счет разномасштабных вкладов факторов и эмерджентных эффектов взаимодействия (Хорошев, 2016; Коновалова, 2012). Динамическое развитие геосистем разного ранга включает циклическую смену их сезонных состояний и служит проявлением свойства устойчивости. Глобальное потепление в XX веке не было однородным: ряд авторов выделяет волны потеплений с 1910 по 1945 гг., с 1976 г. по настоящее время, и слабое похолодание – в период с 1946 по 1975 гг. (Второй оценочный

доклад Росгидромета об изменениях климата ..., 2014). Изменения весенних температур воздуха и почвы, просыхание почвы – важные факторы весенней динамики растений умеренного климатического пояса. Физиологичным геосистемным феноиндикатором наступления такого комплекса условий служит зацветание черемухи обыкновенной *Radusavium Mill.*

Цель исследования – изучение реакции в сроках наступления цветения черемухи обыкновенной в ландшафтных провинциях Северного, Среднего и Южного Урала как вероятного индикатора климатических изменений в периоды потеплений и похолоданий в XX–XXI вв. Феноиндикация позволит моделировать изменение происходящих в природе процессов, влияющих на сельское и лесное хозяйство, рекреацию, природопользование и множество других аспектов жизни человека, что определяет практическую значимость изучения данной проблемы.

Материалы и методы

Согласно схеме физико-географического районирования, предложенной В.И. Прокаевым, изучаемая территория расположена в пределах пяти зонально однородных ландшафтных областей Новоземельско-Уральской равнинно-горной страны: таежной умеренно-континентальной, таежной континентальной, лесостепной умеренно-континентальной, лесостепной континентальной и степной континентальной (Прокаев, 1983). Административно она располагается в пределах Пермского края, Свердловской, Челябинской, Оренбургской областей и Республики Башкортостан. В качестве вспомогательных пунктов для уточнения вектора проведения изохрон использованы данные Кировской, Тюменской, Курганской областей, республики Коми и Удмуртской республики, Северо-Казахстанской и Актыобинской областей республики Казахстан.

В пределах таежной умеренно-континентальной ландшафтной области Урала обособляется 4 провинции: Щугоро-Вишерская западных предгорий Северного Урала, Среднегорная Щугоро-Усьвинская Северного Урала, Косьво-Юрюзанская западных предгорий Среднего Урала, Низкогорная провинция Среднего Урала. Таежная континентальная область Урала включает 3 ландшафтные провинции: Ятрия-Лобвинскую восточных предгорий Северного Урала, Исетско-Лялинскую восточных предгорий Среднего Урала и Тагило-Пышминскую Зауральского пенепплена. В границах лесостепной ландшафтной области Урала в умеренно-континентальных условиях представлена Западная предгорно-среднегорная провинция Южного Урала (Прокаев, 1983; Шакиров, 2011). В континентальном секторе сформировались природные комплексы двух ландшафтных провинций – Восточной предгорно-среднегорной Южного Урала и Исетско-Уйской провинции Зауральского пенепплена. Степная континентальная ландшафтная область занимает крайнее южное положение на территории Южного Урала, в ее пределах выделяются две ландшафтные провинции: Южноуральское плоскогорье и Урало-Тобольская провинция Зауральского пенепплена (Гурьевских и др., 2021).

Изучение динамики сроков зацветания растений производится на основании сбора, обработки и анализа существенного массива первичных данных в пределах опорных пунктов, где производятся более подробные наблюдения. К ним относятся крупные населенные пункты и их окрестности, где собирается не единичное наблюдение, а набор, характеризующий пространственные закономерности процессов динамики природных комплексов. Для изучения фенологии растений в качестве ключевых участков, расположенных в типичных условиях в пределах региона, исследованы слабо- и неизменные природные комплексы. Более полные и стабильные сведения получены из заповедников. Поскольку они расположены в типичных природных условиях, отражают ландшафтное разнообразие и функционируют по единой программе наблюдений Летописи природы, их можно отнести к числу наиболее надежных источников. Накопленный ими фактический материал документального характера содержит информацию о состоянии и динамике природных явлений и процессов, отвечает требованиям достоверности, массовости, репрезентативности и многолетней преемственности. Поэтому в работе использованы материалы Летописей природы заповедников Урала: Басеги, Башкирского, Висимского, Вишерского, Денежкин камень, Ильменского, Печоро-Ильчского, Южно-Уральского, Шульган-Таш, Шайтан-Тау и Оренбургского. В результате инвентаризации архивных документов, локализованных в Фенологическом центре БИН РАН им. В.Л. Комарова, были отобраны первичные фитофенологические данные, собранные по программам Уральского общества любителей естествознания (УОЛЕ), фенологической комиссии Всесоюзного географического общества, РГО. Исследуемая территория отличается развитой промышленностью и сельскохозяйственным освоением, влияние антропогенного фактора сказывается на ходе естественных процессов.

Исходные бумажные материалы были оцифрованы и занесены в электронные таблицы для соответствующих пунктов наблюдений (рис. 1). Они имеют разную степень полноты представленности и непрерывности многолетних рядов дат начала цветения *Padusavium* Mill. Многолетние ряды фенологических наблюдений накоплены классическим методом, по классификации В.А. Батманова – первичным методом группы регистраторов срока, суть которого состоит в регистрации даты наступления какого-либо явления на определенной территории (Янцер, Скок, 2016).

Сложность рельефа и геологического строения гор определяет значительную пестроту режима увлажнения и микроклиматических условий, растительных группировок даже на очень небольших участках. Это обуславливает мозаичность и мелкоконтурность природных комплексов низшего ранга, и определило необходимость генерализации фенологических данных в масштабе ландшафтных провинций. На следующем этапе обработки данных материалы были сгруппированы по территориальному признаку для каждой провинции и проанализированы на дефектность. При статистической обработке материалов рассчитаны средние многолетние даты ($X_{cp.}$) наступления явления по каждому пункту для расчетных периодов, дисперсия (σ^2), стандартное отклонение среднего значения (σ) и крайние даты регистрации явле-

ния (Гурьевских и др., 2021). Даты с отклонением более ± 3 суток от средних и аномальные были исключены из базы данных. Значения среднегодовых фенодат достоверны в интервале $X \text{ ср.} \pm 2\sigma$ согласно допустимому в фенологических исследованиях 5%-му уровню значимости, оцененному по критерию Стьюдента ($P=0.95$). Календарные даты переводились в непрерывные ряды путем отсчета от 1 марта (Зайцев, 1984), рис. 2.

Местоположение	Координаты	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940
Пермский край, Кунгур	57°24'49.3" с. ш. 56°58'53.9" в. д.	29.05	19.05	26.05	11.05	19.05	21.05	23.05	24.05	28.05	11.05	26.05	11.05
Пермский край, Клин	57°52'01" с. ш. 58°38'43" в. д.	30.05		19.05	13.05	30.05	21.05	26.05	31.05				09.06
Пермский край, Пермь	58°00'50" с. ш. 56°14'56" в. д.		23.05	07.05	9.05	15.05	21.05	22.05	27.05			25.05	
Пермский край, Чердынь	60°23'57.1" с. ш. 56°28'57.6" в. д.	07.04	07.06	21.05	25.05	02.06	24.05	31.05	30.05	31.05	28.05	31.05	13.06
Республика Башкортостан, Уфа	54°44' с. ш. 55°58' в. д.	18.05	15.05	08.05	05.04	15.05	17.05	13.05	18.05	15.05	13.05		19.05
Республика Башкортостан, Белорецк	53°58'00" с. ш. 58°24'00" в. д.	19.05	19.05	12.05	24.05	22.05	15.05	01.06	18.05				
Республика Башкортостан, Бирск	55°24'37.3" с. ш. 55°32'48.4" в. д.	21.05	15.05	11.05	09.05	16.05		15.05			15.05	17.05	
Республика Башкортостан, с. Бакалы	55°10'35" с. ш. 53°48'10" в. д.	18.05	12.05	25.04	10.05	13.05	12.05	17.05	22.05	23.05	21.05	21.05	19.05
Свердловская область, Ивдель, д. Лава	60°19'36" с. ш. 60°49'31" в. д.	29.05		20.05	10.05		21.05		26.05		29.05	01.06	24.05
Свердловская область, Ирбит	57°40'00" с. ш. 63°04'00" в. д.	29.05	19.05	14.05	18.05	19.05		15.05	27.05	15.05			
Свердловская область, Верхотурье	58°52'00" с. ш. 60°48'00" в. д.		18.05	18.05	14.05		23.05	29.05		28.05		28.05	03.06
Свердловская область, пос. Висим	57°39" с. ш. 59°29" в. д.	05.05	27.05	09.05	20.05	29.05		24.05	30.05		19.05		21.05
Свердловская область, Висимский район, Висимо-Шайтанский	57°38" с. ш. 59°30" в. д.	03.05	27.05	09.05	20.05	29.05	22.05	24.05	30.05	31.05		29.05	08.06
Свердловская область, Висимский район, д. Захарова	57°41" с. ш. 59°35" в. д.	02.06	27.05	19.05	14.05	31.05	25.05	25.05		27.05	7.05	12.05	16.05
Свердловская область, Егоршино	57°36'59" с. ш. 61°8'62" в. д.	25.05		17.05		23.05	23.05	23.05	31.05	27.05		23.05	21.05
Свердловская область, Екатеринбург		22.05	17.05	15.05	08.05	24.05	31.05	17.05	26.05	29.05	08.05	26.05	26.05
Свердловская область, Краснофимск	56°37'00" с. ш. 57°46'00" в. д.		18.05	22.05	17.05	25.05	20.05	24.05	29.05	02.06	10.05	28.06	02.06
Свердловская область, Кузино	57°01'06" с. ш. 59°26'25" в. д.	27.05	21.05	17.05	12.05	27.05	25.05	25.05	30.05	03.06	14.05	28.05	08.06
Свердловская область, Михайловский завод	45.1267624 с. ш. и 42.0316353 в. д.		30.05	18.05	13.05	25.05		23.05	03.05	25.05	12.05	22.05	21.05
Свердловская область, п. Староуткинск	57°13'40" с. ш. 59°20'00" в. д.	04.06	23.05	15.05	20.05	26.05	24.05	26.05	29.05		21.05		23.05

Рисунок 1. Скриншот исходных данных для некоторых пунктов наблюдений в период 1929-1940 гг.

Figure 1. Screenshot of the initial data for some observation points in the period from 1929-1940

Местоположение	Координаты	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940
Пермский край, Кунгур	57°24'49.3" с. ш. 56°58'53.9" в. д.	90	80	87	72	80	82	84	85	89	72	87	72
Пермский край, Клин	57°52'01" с. ш. 58°38'43" в. д.	91	86	80	74	91	82	87	92	92	92	97	101
Пермский край, Пермь	58°00'50" с. ш. 56°14'56" в. д.	84	68	70	76	82	83	88	87	86	86	86	
Пермский край, Чердынь	60°23'57.1" с. ш. 56°28'57.6" в. д.	38	99	82	86	94	85	92	91	92	89	92	105
Республика Башкортостан, Уфа	54°44' с. ш. 55°58' в. д.	79	76	69	36	76	78	74	79	76	74	77	80
Республика Башкортостан, Белорецк	53°58'00" с. ш. 58°24'00" в. д.	80	80	73	85	83		76	93	79	80	80	
Республика Башкортостан, Бирск	55°24'37.3" с. ш. 55°32'48.4" в. д.	82	76	72	70	77	76	76	76	76	76	78	
Республика Башкортостан, с. Бакалы	55°10'35" с. ш. 53°48'10" в. д.	79	73	56	71	74	73	78	83	84	82	82	80
Свердловская область, Ивдель, д. Лава	60°19'36" с. ш. 60°49'31" в. д.	90	86	81	71	77	82	85	87	89	90	93	85
Свердловская область, Ирбит	57°40'00" с. ш. 63°04'00" в. д.	90	80	75	70	80	78	76	88	76	77		
Свердловская область, Верхотурье	58°52'00" с. ш. 60°48'00" в. д.		79	79	75	80	84	90	90	89	89	89	95
Свердловская область, пос. Висим	57°39" с. ш. 59°29" в. д.	66	88	70	81	90	88	85	91	86	80		82
Свердловская область, Висимский район, Висимо-Шайтанский	57°38" с. ш. 59°30" в. д.	64	88	70	81	90	83	85	91	92	91	90	100
Свердловская область, Висимский район, д. Захарова	57°41" с. ш. 59°35" в. д.	94	88	80	75	92	86	86	87	88	68	73	77
Свердловская область, Егоршино	57°36'59" с. ш. 61°8'62" в. д.	86	82	78	81	84	84	92	88	86	84	82	
Свердловская область, Екатеринбург		83	78	76	69	85	92	78	87	90	69	87	87
Свердловская область, Краснофимск	56°37'00" с. ш. 57°46'00" в. д.	79	83	78	86	81	85	90	94	71	120	94	

Рисунок 2. Скриншот перевода дат путем отсчета от 1 марта с выбраковкой недостающие даты в многолетнем ряду, аппроксимированные автоматически, отмечены красным цветом

Figure 2. Screenshot of the translation of dates by counting from March 1 with culling missing dates in the multi-year series, approximated automatically, are marked in red

Для характеристики динамики произведен расчет линейных трендов по многолетним рядам наблюдений по каждому пункту наблюдений. Оценка тренда проводилась методом наименьших квадратов: находилась линейная функция времени $d^*(t) = At+B$ (Минин, Воскова, 2014; Минин и др., 2018). Более раннее наступление явлений фиксируется отрицательным трендом, более позднее – положительным. Расчет широтного фенологического градиента – время (число суток), в течение которого фронт сезонного явления продвигается на 1° широты (111 км) представлен по изучаемым периодам от 52° до 60° с.ш.

Для визуализации пространственных закономерностей протекания фито-фенологических процессов применялась кроссплатформенная геоинформационная система (ГИС) QGIS Desktop версии 3.26.1 (Воробьева, 2020; Официальный сайт QGIS, 2022).

Результаты

Картографирование позволило создать динамические карты по срокам цветения черемухи в пределах ландшафтных провинций Урала в разные климатические периоды XX-XXI вв. (рис. 3).

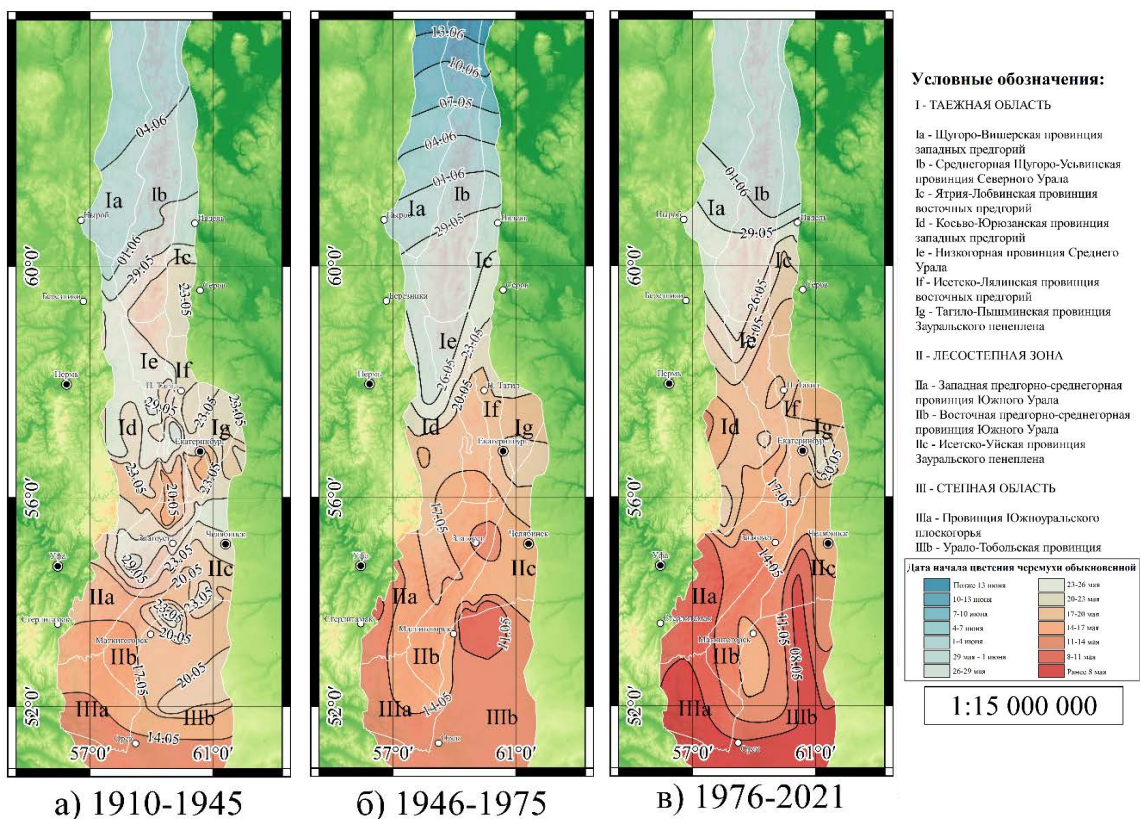


Рисунок 3. Средние многолетние даты начала цветения черемухи обыкновенной по периодам потеплений и похолоданий в 20-21 вв.

Figure 3. Average long - term dates of the beginning of flowering of the common cherry by periods of warming and cooling in the 20th -21st centuries

Проанализирована динамика сроков наступления явления по периодам потеплений и похолоданий. Результатом работы стал расчет и анализ трендов сроков наступления явления в более чем в 500 пунктах фенологической сети Урала и сопредельных территорий. Зацветание черемухи, в среднем, наступает 11 мая на юге региона и наблюдается до 13 июня в горной полосе севера территории. Расположение изофен – субширотное в крайних южной и северной частях. В промежутке от 52° с.ш. до 60° с.ш. конфигурация изолиний сильно варьирует от субмеридиональной до замкнутых изофен. Средний широтный фенологический градиент за весь изучаемый период с 1910 по 2021 гг. составляет 2 сут/1° широты. Минимальными величинами он характеризуется в первый период потепления в восточных предгорьях Урала (1.1 сут/1° широты), максимальными – в западных предгорьях во второй период потепления – с 1976 г. по настоящее время (3.1 сут/1° широты). При похолодании с 1946 по 1975 гг. градиент одинаков на западных, восточных склонах и в предгорьях до 1.9 сут/1° широты.

Обсуждение

Цветение черемухи начинается в степной области: в провинции Южноуральского плоскогорья и на юге Урало-Тобольской провинции и заканчивается в Щугоро-Вишерской провинции западных предгорий, Щугоро-Усьвинской среднегорной провинции Северного Урала и на крайнем севере Ятрия-Лобвинской провинции восточных предгорий. Различия в сроках начала цветения черемухи на Урале составляют от 21 до 24 суток во время волн потепления, более растянут процесс – до 33 суток, в период относительного похолодания 1946-1975 гг. Ход изолиний в большей степени отражает влияние рельефа на сроки наступления явления в периоды потеплений, особенно четко это прослеживается в лесостепной зоне, а также в таежной области: в Косьво-Юрюзанской провинции западных предгорий, в низкогорной провинции Среднего Урала, в южной части среднегорной провинции Северного Урала, в лесостепной Восточной предгорно-среднегорной провинции Южного Урала и в степной зоне – в Урало-Тобольской провинции Зауральского пенепплена.

Различия в сроках зацветания черемухи на одной широте – 52°, 56°, 60° с.ш. между периодами волн потеплений и похолодания составляют 3 суток. С 1910 по 1945 гг. на территории Урала фронт явления проходит за 21 сутки, с 1946 по 1975 гг. процесс максимально растянут – более чем 30 суток, с 1976 года – более чем за 23 суток. Различия в средних многолетних датах наступления цветения черемухи в пределах ландшафтных провинций также находятся в пределах 3-4 суток. Максимальны они между периодом волн потепления 1910 по 1945 гг. и периодом слабого похолодания с 1946 по 1975 гг. Например, в низкогорной провинции Среднего Урала (поселок Висим) разница в средних датах зацветания *Padusavium* Mill составляет до 7 суток, в Восточной предгорно-среднегорной провинции Южного Урала (г. Верхнеуральск) – до 13 суток; между периодом слабого похолодания и последующим с 1976 г. по настоящее время потеплением – 9 суток в Ятрия-Лобвинской провинции восточных предгорий (г. Североуральск), в Исетско-Уйской провинции Зауральского пенепплена (пос. Чебаркуль) до 10 суток.

Во все изучаемые периоды в Щугоро-Вишерской провинции западных предгорий и Ятрия-Лобвинской провинции восточных предгорий Урала отмечено синхронное изменение климата и трендов весеннего развития черемухи. В Тагило-Пышминской провинции Зауральского пенепплена сдвиги сроков весеннего развития черемухи и климатических тенденций несогласованы.

В период потепления с 1910 по 1945 гг. в Восточной предгорно-среднегорной провинции Южного Урала, Исетско-Уйской провинции Зауральского пенепплена, Урало-Тобольской провинции Зауральского пенепплена, Исетско-Северо-Сосьвинской провинции восточных предгорий, Среднегорной провинции Северного Урала, в Косьво-Юрюзанской провинции западных предгорий направленность развития явления имела отрицательный тренд – в большинстве пунктов каждой провинции отмечены более ранние даты. В западных предгорьях Урала повсеместно зацветание черемухи отмечено на 3 суток раньше, чем в восточных.

С 1946 по 1975 гг., при относительном похолодании в Косьво-Юрюзанской провинции западных предгорий, Исетско-Северо-Сосьвинской провинции восточных предгорий, низкогорной провинции Среднего Урала, Исетско-Уйской провинции Зауральского пенепплена, Урало-Тобольской провинции Зауральского пенепплена, наблюдаются отрицательные тренды, маркирующие более раннее цветение. Примечательно, что в примыкающих с запада к Косьво-Юрюзанской провинции равнинных районах в этот период также отмечаются более ранние сроки наступления явления. В Восточной предгорно-среднегорной провинции Южного Урала выявлен нулевой тренд. В это время наблюдается сдвиг изохрон к северу в степной и лесостепной ландшафтных областях. В северных провинциях явление начинается позже на 3-9 суток. Зацветание в западных и восточных предгорьях Южного и Среднего Урала при похолодании происходило в одни сроки, в западных предгорьях Северного Урала – наступало на 1-2 суток раньше по сравнению с восточными.

В период потепления с 1976 г. в Восточной предгорно-среднегорной провинции Южного Урала, в Урало-Тобольской провинции Зауральского пенепплена, Западной предгорно-среднегорной провинции Южного Урала, Косьво-Юрюзанской провинции западных предгорий выявлены тенденции к более раннему цветению черемухи, процессы происходят синхронно. В Исетско-Уйской провинции Зауральского пенепплена и в Среднегорной Щугоро-Усьвинской провинции Северного Урала явление запаздывает. В низкогорной провинции Среднего Урала выявлена разнонаправленность трендов в пунктах наблюдений без преобладающей тенденции. В западных предгорьях Южного и Среднего Урала с 1976 по 2021 гг. отмечено более раннее наступление, как и в период потепления 1910-1945 гг. на 3 суток, при этом в восточных предгорьях Северного Урала оно наблюдалось на 2 суток раньше по сравнению с западными.

Внутри провинций зачастую наблюдаются довольно сильные различия в откликах вида на климатические изменения: не везде общая тенденция потепления или похолодания проявляется в сроках начала цветения черемухи. В ряде пунктов наблюдений в пределах одной провинции на фоне общей тен-

денции развития наблюдается обратная картина. Например, в период потепления с 1910 по 1945 гг. в Косью-Юрюзанской провинции западных предгорий, в целом, отмечены более поздние сроки цветения, но в пунктах наблюдений в Шалинском районе и в Михайловске они синхронно с потеплением климата наступают раньше. А в период похолодания в этой же провинции наблюдаются отрицательные тренды, кроме Шалинского района (Свердловская область), где зацветание черемухи имеет положительный тренд, наступает позже и синхронно с климатическими изменениями. Вероятно, асинхронность климатических трансформаций (температурных характеристик) и знаков тренда цветения черемухи, особенно в период похолодания, связана с влиянием на физиологию вида изменения количества осадков, особенно в предшествующий вегетации и цветению в зимний и ранневесенний периоды (Минин, Воскова, 2014). В ландшафтных областях продвижение фронта начала цветения черемухи в периоды потеплений и похолодания происходит с различной скоростью. Быстрые темпы выявлены для периодов потеплений, особенно в степных и лесостепных ландшафтных областях – до 150 км/сутки. Таежные ландшафтные провинции Северного Урала в эти периоды характеризуются более медленным прохождением явления с юга на север – до 120 км/сутки. В период похолодания степные ландшафты характеризуются возрастанием скоростей – до 200 км/сутки, а в таежной области Урала процесс максимально замедляется, достигая до 60 км/сутки.

Выводы

В большинстве провинций Урала установлена линейная взаимосвязь между датами начала цветения черемухи с периодами потеплений. Несогласованный ход температурных изменений и знаков тренда цветения черемухи в период похолодания может быть обусловлен влиянием изменения количества осадков предшествующего вегетации периода года и особенностями схода и таяния снежного покрова. Средние многолетние даты начала цветения черемухи по периодам волн потеплений и похолодания в пределах ландшафтных провинций, в среднем, отличаются на 3-4 суток. Различия в сроках начала цветения черемухи между ландшафтными провинциями Урала составляют от 21 до 33 суток, достигая максимума в период похолодания в середине XX века. Конфигурация и ход изолиний в большей степени отражает влияние рельефа в периоды потеплений. Фенологическая фаза «начало цветения» черемухи обыкновенной может быть использована в качестве индикатора изменений климата весеннего сезона.

При анализе фенологических закономерностей и механизмов динамики ландшафтов региона при помощи сезонно-динамических карт выявлено влияние на них климатических трансформаций. Соотнесение временных трендов развития феноиндикаторов с вектором изменения как микроклиматических, так и глобальных условий среды на уровне ландшафтных провинций позволит моделировать и прогнозировать реакции вида.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за консультационную помощь: руководителю фенологического центра П.А. Лебедеву (БИН РАН им. В.Л. Комарова), А.А. Минину (ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»), А.А. Чибилеву (Институт степи РАН); за предоставленные материалы: Н.Б. Куянцевой (Ильменский заповедник), И.В. Прокошевой (Вишерский заповедник), Т.К. Тертице (Печоро-Илычский заповедник), К.А. Возмителю и А.Е. Квашниной (заповедник «Денежкин камень»), И.В. Быстрову (Заповедники Оренбуржья), М.Ш. Барлыбаевой (Южно-Уральский государственный заповедник), Н.Р. Леушиной, Н.А. Зенковой, Е.М. Ульяновой (Государственный заповедник «Басеги»), М.Ю. Федорову; А.В. Хлопотовой (Висимский государственный биосферный заповедник), А.И. Биембетову и М.И. Набиуллину (Башкирский государственный природный заповедник).

Список литературы

Воробьева, Т.А., Котова, Т.В., Слипенчук, М.В., Тикунов, В.С. (2020) Картографирование природопользования: опыт комплексных атласов, *Наука. Инновации. Технологии*, №1, с. 125-140.

Гурьевских, О.Ю. Иванова, Ю.Р. Скок, Н.В. Юровских, А.М. Янцер, О.В. Куянцева, Н.Б. Прокошева, И.В. Тертица, Т.К. (2021) Тенденции весеннего развития растительности в условиях ландшафтного разнообразия Урала в контексте климатических изменений, *Успехи современного естествознания*, № 5, с. 51-61.

Зайцев, Г.Н. (1984) *Математическая статистика в экспериментальной ботанике*, Москва, Наука, 424 с.

Коновалова, Т.И. (2012) *Самоорганизация геосистем юга Средней Сибири (исследование и картографирование)*, Новосибирск, Академическое изд-во «Гео», 147 с.

Минин, А.А., Воскова, А.В. (2014) Гомеостатические реакции растений на современные изменения климата: пространственно-фенологические аспекты, *Онтогенез*, № 3(45), с. 162-169.

Минин, А.А., Кузнецова, В.В., Голубева, Е.И. (2014) Фенологические явления в системе биоиндикации климатических трендов, *Проблемы региональной экологии*, № 5, с. 66-71.

Минин, А.А., Ранькова, Э.Я., Буйволов, Ю.А., Сапельникова, И.И., Филатова, Т.Д. (2018) Фенологические тренды в природе центральной части Русской равнины в условиях современного потепления, *Жизнь Земли*, т. 40, № 2, с. 162-174.

Прокаев, В.И. (1983) *Физико-географическое районирование: учеб. пособие для студентов пед. ин-тов*, Москва, Просвещение, 176 с.

Хорошев, А.В. (2016) *Полимасштабная организация географического ландшафта*, Москва, Товарищество научных изданий КМК, 416 с.

Шакиров, А.В. (2011) *Физико-географическое районирование Урала*, Екатеринбург, УрО РАН, 617 с.

Янцер, О.В., Скок, Н.В. (2016) Фенологические методы исследований в изучении динамики ландшафтов: общий обзор, *Вестник Башкирского университета*, т. 21, № 1, с. 91-100.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014), Москва, Росгидрометр, 1007 с.

Официальный сайт QGIS: [электронный ресурс], URL: <https://qgis.org/ru/site/index.html> (Дата обращения: 30.05.2022).

Фенологическая сеть Русского географического общества [электронный ресурс], URL: <https://fenolog.rgo.ru/> (дата обращения: 30.04.2021).

References

Vorobeva, T.A., Kotova, T.V., Slipenchuk, M.V., Tikunov, V.S. (2020) Kartografirovaniye prirodopol'zovaniya: opyt kompleksnyh atlasov [Mapping of nature management: the experience of complex atlases], *Nauka. Innovacii. Tekhnologii*, no. 1, pp. 125-140.

Gur'evskikh, O.Yu., Ivanova, Yu.R., Skok, N.V., Yurovskikh, A.M., Yancer, O.V., Kuyanceva, N.B., Prokosheva, I.V., Tercicza, T.K. (2021) Tendencii vesennego razvitiya rastitel'nosti v usloviyax landshaftnogo raznoobraziya Urala v kontekste klimaticheskikh izmenenij [Trends of spring vegetation development in the conditions of landscape diversity of the Urals in the context of climate change], *Uspexi sovremennogo estestvoznaniya*, no. 5, pp. 51-61.

Zajcev, G.N. (1984) *Matematicheskaya statistika v eksperimental'noj botanike* [Mathematical statistics in experimental botany], Science, Moscow, Russia, 424 p.

Konovalova, T.I. (2012) *Samoorganizaciya geosistem yuga Srednej Sibiri (issledovanie i kartografirovaniye)* [Self-organization of geosystems in the south of Central Siberia (research and mapping)], Academic publishing house "Geo", Novosibirsk, Russia, 147 p.

Minin, A.A., Voskova, A.V. (2014) Gomeostaticheskie reakcii rastenij na sovremennye izmeneniya klimata: prostranstvenno-fenologicheskie aspekty [Homeostatic reactions of plants to modern climate changes: spatial and phenological aspects], *Ontogenez*, no. 3 (45), pp. 162-169.

Minin, A.A., Kuznecova, V.V., Golubeva, E.I. (2014) Fenologicheskie yavleniya v si-steme bioindikacii klimaticheskikh trendov [Phenological phenomena in the system of bioindication of climatic trends], *Problemy regional'noj ekologii*, no. 5, pp. 66-71.

Minin, A.A., Ran'kova, E.Ya., Bujvolov, Yu.A., Sapel'nikova, I.I., Filatova, T.D. (2018) Fenologicheskie trendy v prirode central'noj chasti Russkoj ravniny v usloviyah sovremennogo potepeniya [Phenological trends in the nature of the central part of the Russian Plain in the conditions of modern warming], *Zhizn Zemli*, vol. 40, no. 2, pp. 162-174.

Prokaev, V.I. (1983) *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie: ucheb. posobie dlya studentov ped. in-tov* [Physico-geographical zoning: textbook. allowance for students ped. in-t], Enlightenment, Moscow, Russia, 176 p.

Xoroshev, A.V. (2016) *Polimasshtabnaya organizaciya geograficheskogo landshafta* [Polyscale Organization of the Geographical Landscape], KMK Association of Scientific Publications, Moscow, Russia, 416 p.

Shakirov, A.V. (2011) *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie Urala* [Physical-geographical zoning of the Urals], Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, 617 p.

Yancer, O.V., Skok, N.V. (2016) Fenologicheskie metody issledovanij v izuchenii di-namiki landshaftov: obshchij obzor [Phenological research methods in the study of landscape dynamics: a general overview], *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, vol. 21, no. 1, pp. 91-100.

Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata I ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation] (2014), Roshydrometr, Moscow, Russia, 1007 p.

Oficialnyjsajt QGIS: [elektronnyjresurs], URL: <https://qgis.org/ru/site/index.html> (Data obrashcheniya: 30.05.2022)

Fenologicheskaya set' Russkogo geograficheskogo obshchestva [elektronnyj resurs], URL: <https://fenolog.rgo.ru> (data obrashcheniya: 30.04.2021)

Поступила в редакцию: 05.12.2022.

Доработана после рецензирования: 01.03.2023.

Для цитирования / For citation:

Янцер, О.В., Лаптев, Н.А. (2023) Влияние климатических изменений на сроки начала цветения черемухи обыкновенной на Урале в XX-XXI веке, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 1-2, с. 53-65, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-53-65.

Yantser, O.V., Laptev, N.A. (2023) The influence of climatic changes on the timing of the beginning changes of flowering of common cherry in the Urals in the XX-XXI century, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no. 1-2, pp. 53-65, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-53-65.

Предварительная валидация лесоклиматических проектов с использованием прогнозного имитационного моделирования

В.Н. Шанин^{1),2),3)}, П.В. Фролов^{1),3)}, В.Н. Коротков³⁾*

¹⁾ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», Российская Федерация, 142290, Московская обл., Пушкино, ул. Институтская, 2, корп. 2

²⁾ Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук, Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

³⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Российская Федерация, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б

*Адрес для переписки: *shaninvn@gmail.com*

Реферат. Компенсация негативного воздействия антропогенного фактора на климатическую систему может быть достигнута посредством реализации лесных климатических проектов. Важным предварительным этапом реализации лесного климатического проекта является оценка его эффективности с точки зрения накопления и длительного удержания углерода в экосистеме. Одним из полезных инструментов для подобного анализа может служить прогнозное имитационное моделирование. С помощью данного метода проведена оценка перспектив реализации лесных климатических проектов в центральном Черноземье на участках лесного фонда и участках выведенных из оборота земель сельскохозяйственного назначения с молодыми лесными культурами, естественным возобновлением и безлесными залежами. Для прогноза использовалась комбинация процессно-ориентированной экофизиологической модели древостоя, модели динамики органического вещества почвы и таблиц биологической продуктивности. В качестве возможных вариантов реализации лесных климатических проектов предложены сценарии, предусматривающие улучшенное лесоправление (для земель, занятых лесными насаждениями) и лесоразведение (для земель, выбывших из сельскохозяйственного использования). Применяемые сценарии учитывали видовой состав и возрастную структуру древостоев. Показано, что эффективность реализации проектной деятельности выше, по сравнению с базовой линией, как для покрытых лесом земель лесного фонда, так и для бывших земель сельскохозяйственного назначения. Грамотное применение удобрений в целевых древостоях даёт существенное увеличение поглощающей способности лесных экосистем. Дополнительный эффект может дать длительное сохранение углерода в заготовленных в ходе реализации проекта лесоматериалах.

Ключевые слова. Лесоклиматические проекты, лесовосстановление, бюджет углерода, парниковые газы, прогнозное моделирование.

Preliminary validation of forest climatic projects with predictive simulation modelling

V.N. Shanin^{1),2),3)}, *P.V. Frolov^{1),3)}, *V.N. Korotkov³⁾***

¹⁾ Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Science of the RAS, Federal Research Centre "Pushchino Scientific Centre of Biological Research RAS", 2, bldg. 2, Institutskaya str., 142290, Moscow region, Pushchino, Russian Federation

²⁾ Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, 84/32, bldg. 14, Profsoyuznaya str., 117997, Moscow, Russian Federation

³⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, 20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *shaninvn@gmail.com*

Abstract. Compensation for the negative impact of the anthropogenic factor on the climate system can be achieved through the implementation of forest climatic projects. An important preliminary step in the implementation of the forest climatic project is the assessment of its efficiency in terms of accumulation and long-term retention of carbon in the ecosystem pools. One of the useful tools for such an analysis can be predictive simulation modelling. Using this method, an assessment was made of the prospects for the implementation of forest climate projects in the central Chernozem region in the forest areas and abandoned agricultural lands with young forest crops, natural regeneration and treeless fallows. A combination of a process-based ecophysiological forest stand model, a model of the soil organic matter dynamics, and tables of biological productivity was used for the forecast. As possible options for the implementation of forest climate projects, scenarios are proposed that simulate improved forest management (for forest-covered lands) and afforestation (for abandoned agricultural lands). The applied scenarios took into account the species composition and age structure of forest stands. It is shown that the efficiency of the implementation of project activities is higher compared to the baseline, both for forested lands of the forest fund, and for former agricultural lands. Competent use of fertilizers in target forest stands gives a significant increase in the absorbing capacity of forest ecosystems. An additional effect can be provided by long-term carbon retention in the timber harvested during the project.

Keywords. Forest climatic projects, reforestation, carbon budget, greenhouse gases, predictive modelling.

Введение

Климатические изменения вызывают необходимость компенсации негативного воздействия антропогенного фактора, в т.ч. за счёт увеличения углерод-депонирующей способности разных типов экосистем (Фоменко и др., 2022а). Важную роль в этом играют лесные экосистемы, занимающие порядка 45% (Саркисов, Гуревич, 2021) от общей площади сухопутной территории Российской Федерации. Накопление углерода в лесных экосистемах может

достигаться как за счёт увеличения продуктивности древостоя и нижележащих ярусов растительности, так и за счёт увеличения запасов мортмассы, включая медленно разлагаемые соединения в органо-минеральных горизонтах лесных почв. В этом контексте высокое значение приобретают лесные климатические проекты, связанные с реализацией лесовосстановления и лесовыращивания, а также с усовершенствованием хозяйственной практики на лесопокрытых землях.

Перед воплощением лесного климатического проекта необходимо проанализировать эффективность разных вариантов его реализации с точки зрения накопления и длительного удержания углерода в экосистеме (с учётом, по возможности, всех потенциальных утечек). Реализация проекта должна способствовать дополнительному поглощению диоксида углерода (CO_2) по сравнению с базовой линией (уровню нетто-поглощения CO_2 экосистемами без реализации проекта). Одним из полезных инструментов для подобного анализа может служить прогнозное моделирование (Шанин и др., 2022а), результаты которого могут быть использованы для разработки и валидации лесного климатического проекта (Коротков, 2022). Соответственно, цель работы была сформулирована как оценка перспектив накопления углерода при реализации лесных климатических проектов на участках лесного фонда и участках выведенных из оборота земель сельскохозяйственного назначения с молодыми лесными культурами, естественным возобновлением и безлесными залежами. В качестве возможных вариантов реализации лесоклиматических проектов, направленных на увеличение депонирования углерода лесными экосистемами, предложены сценарии, предусматривающие улучшенное лесопользование (для земель, занятых лесными насаждениями) и лесоразведение (для земель, выбывших из сельскохозяйственного использования).

Материалы и методы

Для прогнозных оценок использовалась комбинация процессных и эмпирических моделей. Модель динамики древостоя EFIMOD 2 (Komarov et al., 2003) сочетает в себе балансовый и популяционный подходы к моделированию динамики древостоев. Имитируется рост отдельных деревьев, имеющих точное положение в пространстве, что позволяет вести дискретный учёт конкуренции между соседними деревьями за ресурсы (свет и доступный азот почвы). Оригинальная версия модели ранее была усовершенствована за счёт добавления новых версий подмоделей конкуренции за ресурсы почвы (Shanin et al., 2015), конкуренции за свет (Shanin et al., 2020), продукции биомассы (Шанин и др., 2019) и её распределения по органам (Komarov et al., 2017b). Модель динамики органического вещества почвы Romul_Hum (Komarov et al., 2017a; Chertov et al., 2017a, 2017b) вычисляет скорости минерализации и гумификации неограниченного количества когорт наземного и подземного опада разного химического состава под влиянием всей почвенной биоты с оценкой пулов С и N в органогенном и органо-минеральном горизонтах (лабильный и стабильный гумус). Определяющими факторами динамики в

модели служат гидротермические условия и характеристики опада и органического вещества почвы (отношение C:N). Модель SCLISS (Быховец, Комаров, 2002) предназначена для расчёта средних месячных значений температуры и влажности органогенных и органо-минеральных горизонтов в зависимости от водно-физических свойств почвы и структуры древостоя на основе стандартных метеорологических наблюдений. *Таблицы биологической продуктивности* (ТБП) описывают динамику во времени основных продукционных показателей (запасы углерода, чистая первичная продукция, и т.д.) для монокультур.

В качестве входных данных по древостою для лесных территорий использовались повыдельные таксационные описания Усманского лесничества (лесоустройство 2017 г.), относящегося к лесостепной зоне. По площади преобладают высокобонитетные сосняки и дубравы, обладающие высоким потенциалом по депонированию углерода с учётом комплекса обязательных мероприятий, которые в настоящее время уже реализуются согласно действующему лесохозяйственному регламенту. На территории лесничества проводится весь комплекс лесохозяйственных мероприятий, включая рубки ухода, санитарные рубки, лесовосстановление, охрану лесов от пожаров, поэтому набор дополнительных мероприятий сильно ограничен. К числу возможных дополнительных мероприятий относятся внесение азотных удобрений (Паавилайнен, 1983; Победов и др., 1984), введение широколиственных пород под полог сосновых насаждений, использование широколиственных пород при лесовосстановлении. Для анализа были выбраны лесопокрытые земли (общая площадь – 2767.5 га); выделы группировались в зависимости от формулы древостоя и группы возраста. Всего было выделено 11 групп (табл. 1): *fPs1*, *fPs2* – сосняки чистые и с примесью лиственных пород до 2 единиц; *fPsLv1*, *fPsLv2* – сосняки с примесью лиственных пород более 2 единиц; *fQr* – дубравы (низкоствольные) чистые и с примесью других пород до 2 единиц; *fQrLv* – дубравы (низкоствольные) с примесью других пород больше 2 единиц; *fLv* – широколиственные древостои, в т.ч. с примесью других пород до 5 единиц; *fBp1*, *fBp2* – березняки, ивняки, в т.ч. с примесью (до 4 единиц) других пород; *fPt* – осинники, в т.ч. с примесью (до 4 единиц) других пород; *fAg* – чёрноольшаники, в т.ч. с примесью (до 4 единиц) других пород.

Аналогичным образом были генерализованы данные по зарастающим землям сельскохозяйственного назначения (общая площадь – 8305.9 га) с молодыми лесными культурами, созданными преимущественно в 2007-2021 гг., естественным возобновлением и безлесными залежами. Все описания участков были сгруппированы по критериям полноты зарастания (незаросшие, частично заросшие или культуры плохой сохранности, заросшие или культуры хорошей сохранности) и породного состава. Всего было выделено 9 групп (табл. 1): *aClr* – незаросшие лесом; *aSl1* – частично заросшие мелколиственными (берёза, осина), в т.ч. с примесью других пород (до 4 единиц); *aPs1* – частично заросшие сосной, в т.ч. с примесью других пород (до 4 единиц); *aLv1* – частично заросшие широколиственными (клён, ясень, дуб), в т.ч. с примесью других пород (до 4 единиц); *aSl2* – культуры или зарастание мел-

колиственными (берёза, осина), в т.ч. с примесью других пород (до 4 единиц); *aPs2* – культуры или зарастание сосной, в т.ч. с примесью других пород (до 2 единиц); *aPsLv2* – культуры или зарастание сосной, в т.ч. с примесью других пород (более 2 единиц); *aQr2* – культуры или зарастание дубом, в т.ч. с примесью других пород (до 2 единиц); *aLv2* – культуры или зарастание широколиственными (клён, ясень), в т.ч. с примесью других пород (до 2 единиц). Для каждой группы вычислялись средний возраст, средний класс бонитета, средняя относительная полнота насаждения.

Таблица 1. Характеристики групп выделов

Table 1. Characteristics of site groups

Группа	<i>S</i>	<i>R_d</i>	<i>A_m</i>	<i>B_m</i>	<i>C_{FF}</i>	<i>N_{FF}</i>	<i>C_{LH}</i>	<i>N_{LH}</i>	<i>C_{SH}</i>	<i>N_{SH}</i>
Земли лесного фонда										
<i>fPs1</i>	304.5	0.73	14	0.9	0.36	0.011	4.11	0.41	2.24	0.25
<i>fPs2</i>	1345.2	0.72	63	0.4	0.68	0.022	3.90	0.39	2.13	0.24
<i>fPsLv1</i>	157.6	0.86	11	0.9	0.49	0.016	4.02	0.40	2.19	0.24
<i>fPsLv2</i>	46.1	0.71	69	0.7	0.97	0.031	3.71	0.37	2.02	0.22
<i>fQr</i>	312.3	0.64	77	2.2	1.35	0.043	3.46	0.35	1.89	0.21
<i>fQrLv</i>	102.7	0.58	80	2.2	1.26	0.040	3.52	0.35	1.92	0.21
<i>fLv</i>	47.9	0.68	34	2.3	1.81	0.063	3.43	0.37	1.86	0.22
<i>fBp1</i>	103.2	0.68	12	2.1	0.52	0.019	4.14	0.46	2.34	0.28
<i>fBp2</i>	73.0	0.59	59	0.8	0.91	0.032	3.89	0.43	2.20	0.27
<i>fPt</i>	31.3	0.85	24	2.1	0.86	0.025	3.46	0.32	1.98	0.20
<i>fAg</i>	243.7	0.71	52	1.8	0.75	0.027	3.99	0.44	2.26	0.27
Зарастающие земли сельскохозяйственного назначения										
<i>aClr</i>	2347.8	–	–	–	1.41	0.050	3.57	0.39	2.02	0.24
<i>aSl1</i>	443.9	0.10	20	0.8	0.68	0.024	4.04	0.44	2.28	0.28
<i>aPs1</i>	70.3	0.10	20	1.3	0.42	0.013	4.06	0.41	2.22	0.25
<i>aLv1</i>	148.1	0.20	15	1.1	0.94	0.032	3.99	0.43	2.16	0.26
<i>aSl2</i>	761.8	0.50	20	0.8	0.83	0.024	3.48	0.32	1.99	0.20
<i>aPs2</i>	1646.5	0.60	10	2.1	0.41	0.013	4.07	0.41	2.22	0.25
<i>aPsLv2</i>	569.1	0.50	12	1.8	0.43	0.014	4.06	0.41	2.21	0.24
<i>aQr2</i>	1440.7	0.50	10	3.3	0.70	0.022	3.88	0.39	2.12	0.23
<i>aLv2</i>	877.7	0.60	10	2.4	0.88	0.028	3.77	0.39	2.06	0.23

Примечание. *S* – общая площадь, га; *R_d* – относительная полнота древостоев; *A_m* – средний возраст древостоев, лет; *B_m* – средний класс бонитета; а также начальные запасы углерода (*C*) и азота (*N*), кг м², в пулах органических (*FF*) и органо-минеральных (*LH* – лабильный гумус, *SH* – стабильный гумус) горизонтов почвы.

Далее в расчётах в качестве элементарной единицы использовались данные группы выделов, однако далее результаты агрегировались для территории в целом. Для оценки динамики пулов фитомассы использовались ТБП

(Швиденко и др., 2008). Из этих таблиц выбирались значения запасов углерода в древостое, соответствующие фактическому классу бонитета для каждой группы как средневзвешенные между двумя ближайшими целыми классами бонитета. Для смешанных древостоев запас углерода рассчитывался как средневзвешенное из ТБП для чистых древостоев, где мерой веса являются доли разных видов. Также запас углерода был скорректирован с учётом фактической полноты древостоя. Аналогичным образом из ТБП извлекались данные по запасам углерода в пулах подроста и подлеска, живого напочвенного покрова (ЖНП). Соотношение биомасс разных органов и их годичный опад рассчитывались на основе модели ранговых распределений (Шанин и др., 2019; Komarov et al., 2017b). Запас углерода в пуле ЖНП корректировался, исходя из допущения о линейной зависимости между биомассой растений ЖНП и сомкнутостью древесного полога (Богородская, Иванова, 2011; Грозовская и др., 2015).

Для оценки влияния взаимодействия между видами на продуктивность смешанных древостоев были проведены серии имитационных экспериментов с помощью модели EFIMOD 2, в которых воспроизводился рост как одновидовых древостоев, так и смешанных с разным начальным соотношением между видами. Поскольку в модели EFIMOD 2 реализован эффект «разделения ниш» (Cavard et al., 2011; Pretzsch et al., 2014) для видов деревьев с разными эколого-фитоценоотическими стратегиями (посредством имитации видоспецифичных особенностей развития крон и корневых систем), позволяющий им при совместном произрастании в смешанных древостоях более эффективно использовать ресурсы среды, в большинстве случаев наблюдается т.н. «дополнительная продуктивность», когда фактическая продуктивность смешанного древостоя оказывается выше ожидаемой, которая рассчитывается как средневзвешенное (на доли видов) значение продуктивности соответствующих одновидовых древостоев (Шанин и др., 2022б). Данный эффект был учтён в форме поправочного коэффициента. Аналогичным образом были получены поправочные коэффициенты, учитывающие влияние рубки на последующий рост древостоев. С помощью экофизиологической модели продукционного процесса (Шанин и др., 2019) были получены поправочные коэффициенты для оценки эффекта от внесения удобрений.

Входные данные для модели Romul_Hum. Помимо получаемых из модели SCLISS среднемесячных значений температуры и влажности подстилки и минеральной почвы, модель Romul_Hum использует в качестве входных данных характеристики разных когорт опада (каждая когорта представляет из себя опад определённого органа – ствол, ветви, листва или хвоя, скелетные и тонкие корни – определённого вида дерева): концентрации углерода, азота и зольных элементов (% от сухой массы). Химические свойства разных когорт опада, наряду с почвенно-климатическими условиями, влияют на скорость их трансформации. Химические свойства разных когорт опада были определены в предшествующих работах (Шанин и др., 2019). Опад древесного яруса, яруса подроста и подлеска и яруса ЖНП рассчитывался, исходя из фиксированных скоростей оборота разных фракций биомассы. Скорость оборота

листвы / хвои и тонких корней деревьев взяты из ТБП, интенсивность отпада стволов – из таблиц хода роста соответствующих насаждений, скорость оборота ветвей и скелетных корней принята равной 0.025 год^{-1} . Опад яруса ЖНП был оценён, принимая скорость оборота надземной и подземной фитомассы равной 0.5 год^{-1} .

Для каждого объекта исследования начальные характеристики пулов органического вещества почвы и азота были предварительно оценены на основе результатов химического анализа образцов почв, собранных на модельных объектах, а также, по данным монографий (Моделирование динамики ..., 2007; Сискевич и др., 2018), исходя из двух имеющихся параметров: типа лесорастительных условий и доминанта древостоя. Дополнительная корректировка была выполнена с применением процедуры «spin-up», при которой модель запускалась на 50 лет при величинах поступления опадов, равных средним значениям при развитии древостоя без воздействий, и достигнутые равновесные значения пулов (т.е. те значения, после достижения которых не происходит видимых изменений величины запасов) далее использовались в качестве начальных. Начальные значения для разных пулов приведены в табл. 1.

Входные данные для модели SCLISS. Исходный сценарий метеорологических условий был получен на основе данных с географически ближайших метеостанций, извлечённых из массивов данных (Бульгина и др., 2022; Ильин и др., 2022; Шерстюков, 2022), подготовленных во Всероссийском НИИ гидрометеорологической информации – Мировом центре данных (ВНИИ ГМИ – МЦД) Росгидромета. Использовались следующие параметры (табл. 2): средняя месячная температура воздуха (T_a , °C); месячная сумма осадков (P , мм); средняя месячная температура почвы на глубине 20 см под поверхностью – косимой травой на метеорологической станции (T_s , °C). Также в качестве входных данных использовалась географическая широта (в градусах).

При конструировании климатического сценария для имитации стационарного климата в качестве базового был выбран период с 1967 по 2011 гг. Из полученных выборок были удалены записи за все годы, содержащие пропуски для одного или более показателя за один или более месяц, т.е. были оставлены только записи за годы, которые содержат полную информацию. Далее для каждого модельного объекта были сгенерированы стационарные климатические сценарии посредством выборки случайным образом данных за полные годы (с целью сохранения как внутригодовой автокорреляции параметров, так и корреляции между параметрами) до достижения 50-летней продолжительности (с месячным шагом). Полученные сценарии были проверены на отсутствие трендов как путём визуального контроля диаграмм показателей, так и с помощью аппроксимации показателей линейной функцией (проверялось отсутствие значимого отличия коэффициента наклона линейной функции от 0). Величина антропогенного поступления с атмосферными осадками была принятой равной $3.6 \text{ кг га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (Jia et al., 2016). Необходимые для работы модели почвенно-гидрологические константы (влажность устойчивого завядания (об. %), наименьшая полевая влагоёмкость (об. %) и полная влагоёмкость (об. %) минеральной почвы) были оценены на основе литературных источников (Зинченко,

2018). Величины видоспецифичных коэффициентов модели SCLISS, описывающих влияние неоднородности полога на почвенно-климатические условия, были оценены ранее (Грабарник и др., 2019).

Таблица 2. Характеристики климатических сценариев для модельных объектов

Table 2. Characteristics of climatic scenarios for simulated areas

Объект	Земли лесного фонда			Зарастающие земли сельскохозяйственного назначения		
	«Воронеж»			«Конь-Колодезь»		
Метеостанция	«Воронеж»			«Конь-Колодезь»		
Географическая широта, градусов	51.7			52.6		
Код метеостанции	34123			34026		
Показатели	T_a	T_s	P	T_a	T_s	P
январь	-7.0	-1.0	45	-7.7	-0.9	32
февраль	-6.7	-1.1	36	-7.5	-0.8	28
март	-1.0	0.1	33	-1.6	-0.1	26
апрель	8.6	6.6	39	8.4	5.1	33
май	15.0	14.1	49	15.0	11.8	43
июнь	18.6	18.5	68	18.8	15.3	65
июль	20.3	20.6	61	20.4	17.2	66
август	19.1	19.9	53	19.0	15.9	44
сентябрь	13.1	14.6	60	12.8	11.0	53
октябрь	7.0	8.7	47	6.6	6.4	44
ноябрь	-0.1	2.8	47	-0.8	1.6	39
декабрь	-4.9	0.0	47	-5.6	-0.3	37
Среднее (для температур) / сумма (для осадков) за год	6.8	8.7	585	6.5	6.9	510

Валидация модели выполнена по региональным таблицам хода роста (Усольцев, 2016; Швиденко и др., 2008). Проводился имитационный эксперимент с использованием метода Монте-Карло (Kotegov et al., 2003) для оценки эффекта неопределённости входных параметров модели, с 20%-м варьированием (равномерное распределение) начальных параметров по запасам органического вещества в пулах почвы. Значения среднего диаметра, средней высоты и плотности для древостоев определённого возраста, рассчитанные с помощью модели, соотносили с таблицами хода роста согласно методике, изложенной в работе (Pineiro et al., 2008). Для этого пары значений в координатах «смоделированное – фактическое» были аппроксимированы прямой вида $y = s \times x$. Для оценки соответствия между результатами моделирования и данными из таблиц хода роста использовались коэффициент детерминации R^2 , который характеризует случайные отклонения, и коэффициент наклона аппроксимирующей прямой s , характеризующий систематические отклонения. Валидация показала удовлетворительное соответствие прогнозных

результатов фактическим данным (R^2 находился в диапазоне от 0.982 до 0.997; s – в диапазоне от 0.989 до 1.027).

Имитационные сценарии. Для лесного участка были приняты следующие сценарии. Базовый сценарий (fBAU – «business as usual») предусматривал стандартный набор рубок ухода и рубок главного пользования. В сосняках возрастом до 10 лет при полноте больше 0.8 проводилась рубка осветления до полноты 0.6; в возрасте до 20 лет при полноте больше 0.8 – прочистка до полноты 0.6; в возрасте до 60 лет и полноте больше 0.8 – прореживание до полноты 0.6 с повторяемостью не чаще 1 раза в 10 лет. После 61 года – проходные рубки с интенсивностью 10-15% по полноте и повторяемостью не чаще 1 раза в 15 лет. После достижения возраста 101 год – вырубка 50% по полноте в три приёма. Искусственное возобновление проводилось культурами сосны. В сосняках с примесью других пород рубки ухода были аналогичными, но целевое значение полноты при рубках ухода было установлено на 0.1 единицы ниже. В дубовых древостоях при возрасте до 20 лет и полноте свыше 0.8 имитировалась прочистка до полноты 0.7; при возрасте до 40 лет и полноте свыше 0.8 – прореживание интенсивностью 20% по полноте и повторяемостью не чаще 1 раза в 10 лет. В возрасте более 41 года при полноте больше 0.8 имитировались проходные рубки до полноты 0.7 повторяемостью не чаще 1 раза в 15 лет. После достижения возраста 71 год имитировалась вырубка 100% в 2-3 приёма. Искусственное возобновление имитировалось монокультурами дуба. В дубовых древостоях с примесью других пород параметры рубок были аналогичными, но целевое значение полноты было установлено на 0.1 единицы ниже. В широколиственных древостоях, березняках, осинниках и чёрноольшаниках рубки ухода не имитировались; проводились только рубки обновления (100% в 2-3 приёма) в возрасте 61 год для широколиственных древостоев, березняков и чёрноольшаников, и в возрасте 51 год – для осинников. Во всех этих типах древостоев имитировалось естественное возобновление. Сценарий fBAU+F («+fertilization») соответствовал базовому (fBAU), но с имитацией внесения азотных удобрений (аммиачная селитра, 50 кг действующего вещества (N) на 1 га) в сосновых и дубовых древостоях 40-70-летнего возраста 1-3 классов бонитета (в древостоях 1а класса бонитета внесение удобрений не имитировалось). В сценарии проектной деятельности (fIFM – «improved forest management») параметры рубок были идентичны базовому сценарию (fBAU), но с имитацией введения культур клёна остролистного и липы под полог в сосняках и культур, состоящих из 80% дуба с примесью ясеня и клёна остролистного после рубок обновления в дубовых, полидоминантных широколиственных, берёзовых и осиновых древостоях. В чёрноольшаниках на низовых болотах имитировалось возобновление культурами чёрной ольхи. Сценарий fIFM+F соответствовал сценарию проектной деятельности (fIFM), но с имитацией внесения азотных удобрений аналогично сценарию fBAU+F.

Сценарий aBAU для заброшенных сельскохозяйственных земель предусматривал развитие участка без проведения хозяйственных мероприятий. При сценарии aIFM_BL+F имитировалось создание культур дуба и ясеня с участием

клёна остролистного. На частично заросших сельхозугодьях с недостаточным возобновлением предусматривалось дополнение за счёт посадки тех же культур, что на и открытых участках. На участках с культурами или с хорошим возобновлением имитировалось внесение удобрений в насаждения старше 10 лет и рубки ухода согласно нормативам базового сценария для участка лесного фонда. В сценарии aIFM_FG на открытых участках имитировалось создание культур быстрорастущих пород (берёза, осина). На частично заросших сельхозугодьях с недостаточным возобновлением предусматривалось дополнение за счёт создания культур быстрорастущих пород. На участках с культурами или с хорошим возобновлением имитировалось проведение рубок ухода согласно нормативам базового сценария для участка лесного фонда.

Для всех рубок ухода предполагалось оставление на участке всех порубочных остатков, кроме 50% (по фитомассе) стволовой древесины. Для рубок главного пользования имитировалось оставление на участке 100% фитомассы ветвей и листвы и 5% фитомассы стволов. В сценариях, предусматривающих создание культур быстрорастущих пород, имитировалось изъятие 95% всей наземной фитомассы. Во всех вариантах подземная фитомасса предполагалась остающейся на участке. Пересчёт изъятых углерода фитомассы столов в запас заготовленной древесины проводился с помощью конверсионных коэффициентов, при этом учитывалась только доля фитомассы стволов, изымаемая с участка.

Результаты и обсуждение

Поскольку значительная часть территории лесных земель представлена молодняками и средневозрастными насаждениями, запас углерода в древостое возрастает во всех сценариях (рис. 1). Сценарий с проектной деятельностью (fIFM), в силу высадки высокопродуктивных культур широколиственных пород, показал более высокое накопление углерода в древостое, по сравнению с базовым (fBAU). Однако намного более существенный эффект на накопление углерода в древостое оказывает внесение удобрений (сценарии fBAU+F, fIFM+F). При этом также стоит отметить, что рубки ухода способствуют улучшению условий роста для остающихся деревьев, поэтому скорость прироста запасов углерода в данных сценариях выше, чем в контрольном. Схожая картина наблюдается для подроста и подлеска. Углерод живого напочвенного покрова возрастает, поскольку при рубках создаются разрежения в пологе леса, за счёт чего возрастает подпологовая освещённость и, как следствие, продуктивность растений живого напочвенного покрова. Наибольший вклад в динамику общего запаса углерода фитомассы вносит углерод в древостое, поэтому динамика двух данных пулов схожа.

В течение всего периода моделирования происходит накопление углерода в органогенном горизонте, в основном за счёт поступления порубочных остатков. Динамика углерода в целом соответствует различиям между сценариями по показателю продуктивности древостоев и, как следствие, по количеству опада и порубочных остатков. Динамика запаса углерода в органо-минеральных горизонтах схожа с таковой в органогенных горизонтах. Вклад

органо-минеральных горизонтов в динамику общего запаса углерода в почве более значителен, по сравнению с органогенными. Характер динамики запасов углерода в пуле сухостоя и валежа отражает динамику поступления крупных древесных остатков (КДО). Поскольку начальные значения запаса углерода в данном пуле приняты равными 0, во всех сценариях происходит накопление. Дополнительное накопление обеспечивается за счёт поступления КДО в форме порубочных остатков при рубках ухода. Общий экосистемный запас углерода возрастает за 50 лет при всех сценариях (см. рис. 1), причём в сценариях с внесением удобрений происходит более интенсивное накопление (+0.13 Тг углерода для всей территории лесных земель, или +0.94 Мг га⁻¹ год⁻¹, в сценарии fBAU, +0.22 Тг (+1.59 Мг га⁻¹ год⁻¹) – в сценарии fBAU+F, +0.15 Тг (+1.08 Мг га⁻¹ год⁻¹) – в сценарии fFM, +0.24 Тг (+1.73 Мг га⁻¹ год⁻¹) – в сценарии fFM+F). Полученные значения сопоставимы с прогнозными оценками, представленными в предшествующих работах (Замолодчиков, Никитина, 2022; Липка и др., 2021; Masera et al., 2003). Отклонения в полученных нами средних значениях накопления углерода от ранее опубликованных данных могут быть объяснены более благоприятными условиями для произрастания леса на объектах нашего исследования. Положительный эффект внесения удобрений на повышение продуктивности лесов и накопление углерода в экосистемных пулах отмечался ранее (Степаненко, 2010; Щепашенко и др., 2023; Albaugh et al., 2019; Bracho et al., 2018).

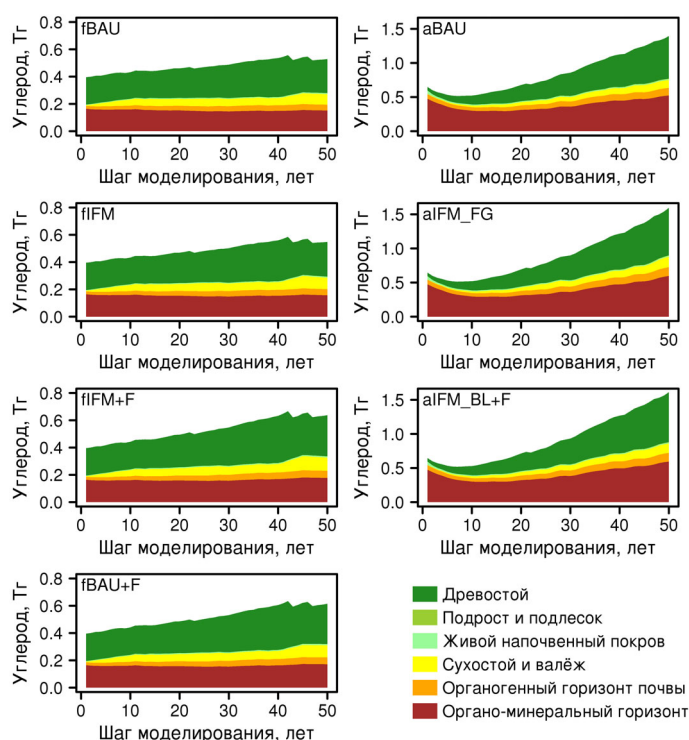


Рисунок 1. Динамика запаса углерода в экосистемных пулах при разных имитационных сценариях

Figure 1. Dynamics of carbon stocks in ecosystem pools at different simulation scenarios

В отличие от динамики углерода, которая определяется в большей степени внесением удобрений, по сравнению с лесохозяйственным сценарием, на заготовку древесины оба фактора влияли примерно в равной степени (рис. 2). Данный показатель оказался выше в сценарии с проектной деятельностью (fIFM), по сравнению с обоими вариантами базового (с внесением удобрений и без внесения, fBAU и fBAU+F), и максимальным – в сценарии проектной деятельности в комбинации с внесением удобрений (fIFM+F). Поток минерализации при разных сценариях в целом соответствует количеству поступающих на поверхность и внутрь почвы растительных остатков (как опада, так и порубочных остатков).

К особенностям динамики пулов углерода на заброшенных землях сельскохозяйственного назначения можно отнести более интенсивное относительное накопление углерода в древостое, связанное с тем, что на данном модельном объекте все древостои представляют собой молодняки. При этом накопление в сценарии aBAU ниже, по сравнению с другими лесохозяйственными сценариями, в силу того, что значительную часть территории составляют участки, не покрытые лесом, которые, согласно правилам данного сценария, оставались такими на протяжении всего периода моделирования. Введение культур широколиственных пород (сценарий aIFM_BL+F) в комбинации с внесением удобрений оказалось схожим по эффективности с введением культур быстрорастущих пород (aIFM_FG).

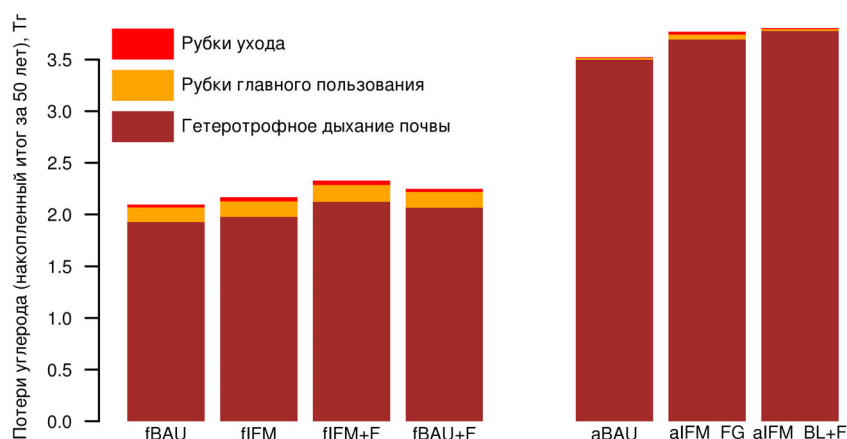


Рисунок 2. Потери углерода за счёт минерализации и изъятия при рубках (сумма за 50-летний период моделирования для всей территории)

Figure 2. Carbon losses due to mineralization and removal during cuttings (sum for 50-years period for the whole area)

В сценариях aIFM_BL+F и aIFM_FG происходит существенное снижение запаса углерода в живом напочвенном покрове в силу возрастания сомкнутости полога и, как следствие, снижения уровня подпологовой освещённости. Запасы углерода в почве после начального снижения, связанного с низким количеством опада в молодняках, начинают возрастать после первой трети периода моделирования (см. рис. 1). Общий запас углерода в наибольшей сте-

пени возрастает в сценарии aIFM_{BL}+F (изменение за весь 50летний период моделирования составляет +0.97 Тг углерода для всей территории заброшенных земель сельскохозяйственного назначения, или +2.34 Мг га⁻¹ год⁻¹), в меньшей – в сценарии aIFM_{FG}, в т.ч. в силу изъятия при рубках значительной части биомассы листвы и ветвей (+0.95 Тг, или +2.29 Мг га⁻¹ год⁻¹). Наименьшее накопление наблюдается в сценарии aBAU (+0.75 Тг, или +1.81 Мг га⁻¹ год⁻¹). Также сценарий aIFM_{FG} характеризуется более высоким объёмом заготовленной древесины (см. рис. 2).

Согласно решениям, принятым в рамках Парижского соглашения, максимальная продолжительность лесного климатического проекта не может превышать 45 лет, поэтому оценка потенциала проектной деятельности (табл. 3) выполнялась посредством сравнения общего запаса углерода на 45-м шаге моделирования для разных сценариев с базовой линией (сценарии fBAU/aBAU).

Таблица 3. Сравнение сценариев моделирования по показателям накопления углерода в экосистемах за максимальное время выполнения проекта в течение 45 лет

Table 3. Comparison of simulation scenarios in terms of ecosystem carbon accumulation during the project implementation for 45 years

Показатели (в пересчёте на углерод)	Сценарии моделирования						
	Лесные участки				Бывшие с/х земли		
	fBAU	fBAU+F	fIFM	fIFM+F	aBAU	aIFM _{BL} +F	aIFM _{FG}
Накопление углерода в экосистеме, Мг га ⁻¹	53.03	81.57	61.63	91.68	72.17	93.90	87.71
Выбросы от применения удобрений, Мг га ⁻¹	–	0.35	–	0.35	–	0.27	–
Накопление за вычетом базовой линии и эмиссии от применения удобрений, Мг га ⁻¹	–	28.19	8.60	38.30	–	21.46	15.54
Средняя скорость накопления углерода, Мг га ⁻¹ год ⁻¹	1.18	1.81	1.37	2.04	1.60	2.09	1.95
Средняя скорость накопления углерода за вычетом базовой линии и эмиссии от применения удобрений, Мг га ⁻¹ год ⁻¹	–	0.63	0.19	0.85	–	0.48	0.35
Накопление углерода в заготовленных лесоматериалах, Мг га ⁻¹	61.19	66.26	68.70	75.06	2.96	3.28	9.03

Потенциал накопления углерода (разность между величиной общего экосистемного запаса на 45-м шаге моделирования и его начальным значением) на лесных землях составляет от 53.03 Мг га⁻¹ для сценария fBAU до 91.68 Мг га⁻¹ для сценария fFM+F. Средняя скорость накопления за вычетом базовой линии составила 0.19-0.85 Мг га⁻¹ год⁻¹. Наибольший эффект в отношении накопления даёт внесение удобрений в сочетании с восстановлением смешанных лесов с участием широколиственных видов деревьев (рис. 3). Дополнительный эффект может дать длительное сохранение углерода в заготовленных лесоматериалах, однако учёт базовой линии также сокращает этот потенциал. Дополнительное максимальное накопление углерода в заготовленных лесоматериалах может составить от 66.26 до 76.06 Мг га⁻¹.

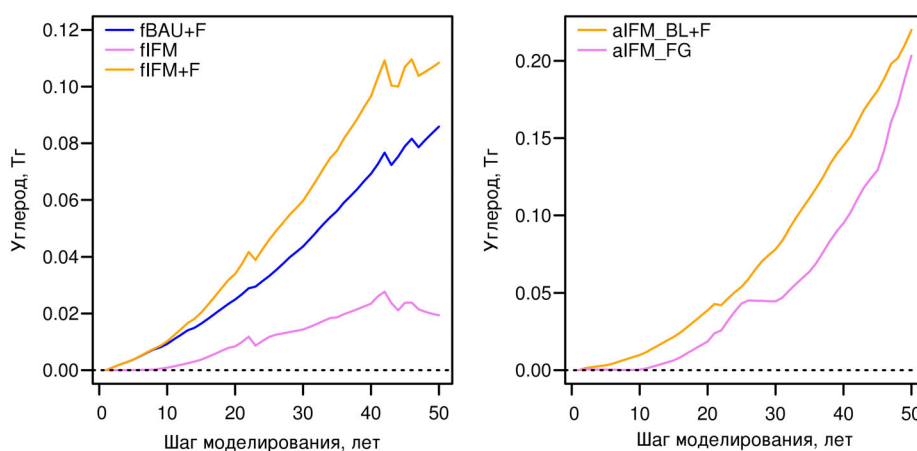


Рисунок 3. Отклонение общего экосистемного запаса углерода для всей моделируемой территории лесных (слева) и нелесных (справа) земель от базовой линии (сценарии fBAU/aBAU) при разных имитационных сценариях

Figure 3. The difference of total ecosystem carbon stock from the baseline (scenarios fBAU/aBAU) for the whole area of forest lands (left) and former agricultural lands (right) at different simulation scenarios

Потенциал накопления углерода лесными насаждениями, созданными на выбывших из использования землях сельскохозяйственного назначения, оказывается выше для сценария aIFM_BL+F (93.90 Мг га⁻¹), по сравнению с проектными сценариями на землях Усманского лесничества, а результаты сценария aIFM_FG (87.71 Мг га⁻¹) несколько уступают сценарию fFM+F. Средняя скорость накопления за вычетом базовой линии составила 0.35–0.48 Мг га⁻¹ год⁻¹. Наибольший эффект даёт внесение удобрений в сочетании с созданием смешанных культур широколиственных видов деревьев. Относительно небольшой дополнительный эффект может дать длительное сохранение углерода в заготовленных лесоматериалах: 2.96-9.03 Мг га⁻¹. Очевидно, что потенциал лесоклиматического проекта на залежах, лишённых древесно-кустарниковой растительности, может быть выше, поскольку в этом случае базовая линия будет близка к нулю. Важность реализации устойчивого лесопользования, а также вовлечения в лесовосстановление выведенных из сель-

скохозяйственного использования нелесных земель для смягчения негативных последствий изменения климата подчёркивается многими исследователями (Mayer et al., 2020; Ontl et al., 2020).

Применяемый подход имеет ряд ограничений, которые необходимо принимать во внимание при анализе полученных результатов. В частности, в модели Romul_Hum рассматривается динамика лабильных (растительные остатки и гуминовые вещества, ассоциированные с растительными остатками) и относительно стабильных (гуминовые вещества, ассоциированные с минеральной матрицей верхних органо-минеральных горизонтов почвы) пулов углерода. Однако модель Romul_Hum не учитывает т.н. «сверхстабильное» органическое вещество почвы, к которому можно отнести, например, органическое вещество глубоких почвенных горизонтов, и пирогенный углерод, возникающий в результате неполного сгорания органического вещества (Lehmann, Kleber, 2015). Данный пул характеризуется крайне низкими скоростями разложения, составляющими сотни и тысячи лет (Kuzyakov et al., 2009). Как следствие, данное ограничение модели может приводить к тому, что на этапе молодняков, когда количество поступающего опада невелико, а минерализация органического вещества в органо-минеральных горизонтах не полностью компенсируется его накоплением за счёт гумификации растительных остатков, потери органического вещества могут быть переоценены. Таким образом, хотя модель оперирует не генетическими горизонтами почвы, а пулами ОВ, фактически можно считать, что она описывает динамику углерода верхнего слоя (0-30 см) минеральной почвы. Также стоит отметить возможные неопределённости в оценке начальных запасов органического вещества в пулах мортмассы, которые могут оказать влияние на характер динамики (снижение или рост) на начальных этапах моделирования, а также неопределённости, связанные с оценкой влияния на баланс углерода лесохозяйственных мероприятий и взаимодействия между видами в смешанных древостоях. Дополнительная неопределённость связана с тем, что в прогнозе не учитывают возможные будущие изменения климата.

Заключение

Данное исследование продемонстрировало возможности применения прогностического моделирования для оценки эффективности разных вариантов проектной деятельности. Поскольку значительная часть рассматриваемой территории представлена молодняками и средневозрастными насаждениями, имитационные эксперименты показали, что запас углерода в древостое возрастает во всех сценариях. Эффективность реализации проектной деятельности для накопления углерода в экосистемных пулах выше при создании высокопродуктивных культур широколиственных или быстрорастущих мелколиственных пород по сравнению с базовой линией («business as usual»). Дополнительный эффект на накопление углерода в древостое оказывает внесение удобрений. Также происходит накопление углерода в мортмассе за счёт поступления опада и порубочных остатков. Как следствие, общий экосистемный запас углерода возрастает за

50 лет при всех сценариях, и более интенсивное накопление наблюдается в сценариях проектной деятельности и/или с внесением удобрений. Полученные прогнозы показали, что реализация проектов в высокопродуктивных лесных насаждениях не приведёт к выраженному дополнительному эффекту, поэтому для реализации желательно выбирать низкопродуктивные леса и выведенные из сельскохозяйственного использования нелесные земли. Тем не менее, выполненные прогнозные оценки следует рассматривать как предварительные, в силу описанных выше ограничений.

Основная цель лесовосстановления и лесоразведения (помимо увеличения углерод-депонирующей способности лесных экосистем) – создание разновозрастных полидоминантных лесных экосистем, близких к естественным и отличающихся более высокой устойчивостью к грибным болезням и вспышкам численности насекомых-фитофагов (Фоменко и др., 2022б). Для условий центрального Черноземья целесообразно создавать культуры широколиственных пород (дуб, ясень, граб, липа, клён остролистный, вяз) в сочетании с культурами сосны обыкновенной. Рекомендуется полишахматное размещение культур разных видов деревьев (Коротков, 2016). Грамотное применение удобрений (вместе с азотными и другими удобрениями, подкисляющими почву, вносят известь) в целевых древостоях с соблюдением сроков и норм даёт существенное увеличение поглощающей способности лесных экосистем.

Сопутствующие выгоды от реализации лесных климатических проектов могут быть следующими: (1) увеличение биологического разнообразия в связи с использованием более широкого набора местных видов широколиственных деревьев и вследствие появления островных лесов среди агроландшафтов; (2) накопление углерода в почве и восстановление почвенного плодородия; (3) повышение продуктивности древостоев и количества заготавливаемой древесины; (4) повышение устойчивости лесных насаждений, снижение риска вспышек фитопатогенов за счёт замещения монокультур сосны аборигенными видами широколиственных деревьев; (5) снижение риска пожарной опасности за счёт замещения части сосновых молодняков широколиственными насаждениями; (6) снижение риска эрозии и дефляции почвенного покрова на прилегающих пахотных угодьях.

Полученные результаты показали перспективность использования методов имитационного моделирования для предварительной оценки эффективности дополнительных мероприятий, направленных на усиление углерод-депонирующей способности лесных экосистем. Полученные прогнозы дают возможность выбирать оптимальные сценарии лесопользования на этапах проектирования и валидации лесного климатического проекта.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за организацию полевых работ и помощь в работе научному сотруднику ФГБУ «ИГКЭ» А.А. Трунову. Также благодарим рецензента за высказанные замечания, позволившие улучшить текст статьи.

Список литературы

Богородская, А.В., Иванова, Г.А. (2011) Микробиологический мониторинг состояния почв после пожаров в сосново-лиственничных насаждениях нижнего Приангарья, *Хвойные бореальной зоны*, т. XXVIII, № 1-2, с. 98-106.

Булыгина, О.Н., Разуваев, В.Н., Трофименко, Л.Т., Швец, Н.В. (2022) *Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России*, URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature> (дата обращения 14.06.2022).

Быховец, С.С., Комаров, А.С. (2002) Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом, *Почвоведение*, № 4, с. 443-452.

Грабарник, П.Я., Чертов, О.Г., Чумаченко, С.И., Шанин, В.Н., Ханина, Л.Г., Бобровский, М.В., Быховец, С.С., Фролов, П.В. (2019) Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы, *Математическая биология и биоинформатика*, т. 14, № 2, с. 488-499, doi: 10.17537/2019.14.488.

Грозовская, И.С., Ханина, Л.Г., Смирнов, В.Э., Бобровский, М.В., Романов, М.С., Глухова, Е.М. (2015) Биомасса напочвенного покрова в еловых лесах Костромской области, *Лесоведение*, № 1, с. 63-76.

Замолотчиков, Д.Г., Никитина, А.Д. (2022) Потенциал лесоклиматических проектов в аридных регионах России, *Научные основы устойчивого управления лесами: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН, Москва, 25-29 апреля 2022 года*, М., ЦЭПЛ РАН, с. 220-222.

Зинченко, С.И. (2018) Характеристика отдельных физических и почвенно-гидрологических свойств метрового профиля серой лесной почвы, *Владимирский земледелец*, № 1(83), с. 2-5, doi: 10.24411/2225-2584-2018-00001.

Ильин, Б.М., Булыгина, О.Н., Богданова, Э.Г., Веселов, В.М., Гаврилова, С.Ю. (2022) *Описание массива месячных сумм осадков, с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов*, URL: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov> (дата обращения 14.06.2022).

Коротков, В.Н. (2016) Концепция восстановления разновозрастных полидоминантных хвойно-широколиственных лесов Восточной Европы, *Устойчивое лесопользование*, № 3(47), с. 2-7.

Коротков, В.Н. (2022) Лесные климатические проекты в России: ограничения и возможности, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, vol. 7(4), pp. 1-8, doi: 10.21685/2500-0578-2022-4-3.

Липка, О.Н., Замолотчиков, Д.Г., Каганов, В.В., Мазманянц, Г.А., Исупова, М.В., Алейников, А.А. (2021) Климатический эффект восстановления лесов в дельте р. Или, *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, т. 85, № 4, с. 579-594, doi: 10.31857/S2587556621040051.

Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах (2007) Под редакцией В.Н. Кудеярова, М., Наука, 380 с.

Паавилайнен, Э. (1983) *Применение минеральных удобрений в лесу*, М., Лесная промышленность, 96 с.

Победов, В.С., Булавик, И.М., Лебедев, Е.А. (1984) *Отечественный опыт удобрения лесов: Обзорная информация*, М., ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 26 с.

Саркисов, О.Р., Гуревич, В.А. (2021) Проблемы российского лесокомплекса и вопросы совершенствования лесного законодательства, *Вестник экономики, права и социологии*, № 1, с. 88-93.

Сискевич, Ю.И., Никоноренков, В.А., Долгих, О.В., Ахтырцев, А.Б., Сушков, В.Д. (2018) *Почвы Липецкой области*, Липецк, Издательство ООО «Позитив Л», 209 с.

Степаненко, И.А. (2010) *Интенсификация целевого выращивания сосновых насаждений в южно-таёжном лесном районе таёжной зоны европейской части России*, диссертация на соискание уч. ст. д-ра с.-х.н., М., 357 с.

Усольцев, В.А. (2016) *Биологическая продуктивность лесобразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов)*, Екатеринбург, УГЛТУ, 383 с.

Фоменко, Г.А., Романовская, А.А., Фоменко, М.А., Лошадкин, К.А., Климов, Е.В., Липка, О.Н., Коротков, В.Н., Алдошина, А.С. (2022а) Лесные климатические проекты: возможности и проблемы реализации ESG-подхода. Часть 1, *Проблемы региональной экологии*, № 2, с. 91-106, doi: 10.24412/1728-323X-2022-2-91-106.

Фоменко, Г.А., Романовская, А.А., Фоменко, М.А., Лошадкин, К.А., Климов, Е.В., Липка, О.Н., Коротков, В.Н., Алдошина, А.С. (2022б) Лесные климатические проекты: возможности и проблемы реализации ESG-подхода. Часть 2, *Проблемы региональной экологии*, № 3, с. 65-74, doi: 10.24412/1728-323X-2022-3-65-74.

Шанин, В.Н., Грабарник, П.Я., Быховец, С.С., Чертов, О.Г., Припутина, И.В., Шашков, М.П., Иванова, Н.В., Стаменов, М.Н., Фролов, П.В., Зубкова, Е.В., Ручинская, Е.В. (2019) Параметризация модели продукционного процесса для доминирующих видов деревьев Европейской части РФ в задачах моделирования динамики лесных экосистем, *Математическая биология и биоинформатика*, т. 14, № 1, с. 54-76, doi: 10.17537/2019.14.54.

Шанин, В.Н., Фролов, П.В., Коротков, В.Н. (2022а) Всегда ли искусственное лесовосстановление может быть лесоклиматическим проектом? *Вопросы лесной науки*, т. 5, № 2, статья № 106, doi: 10.31509/2658-607x-202252-106.

Шанин, В.Н., Фролов, П.В., Припутина, И.В., Чертов, О.Г., Быховец, С.С., Зубкова, Е.В., Портнов, А.М., Фролова, Г.Г., Стаменов, М.Н., Грабарник, П.Я. (2022б) Моделирование динамики лесных экосистем с учётом их структурной неоднородности на разных функциональных и пространственных уровнях,

Вопросы лесной науки, т. 5, № 3, статья № 112, doi: 10.31509/2658-607x-202252-112.

Швиденко, А.З., Щепашенко, Д.Г., Нильссон, С., Булуй, Ю.И. (2008) *Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы)*, 2-е изд., М., Федеральное агентство лесного хозяйства и Международный институт прикладного системного анализа, 886 с.

Шерстюков, А.Б. (2022) *Описание массива суточных данных о температуре почвы на глубинах до 320 см по метеорологическим станциям Российской Федерации (версия 2)*, URL: <http://meteo.ru/data/164-soil-temperature> (дата обращения 14.06.2022).

Щепашенко, Д.Г., Мухортова, Л.В., Мартыненко, О.В. (2023) *База данных по применению минеральных удобрений в лесном хозяйстве и их влиянию на углеродный бюджет лесов*, URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7693698> (дата обращения 14.03.2023).

Albaugh, T.J., Fox, T.R., Cook, R.L., Raymond, J.E., Rubilar, R.A., Campoe, O.C. (2019) Forest fertilizer applications in the southeastern United States from 1969 to 2016, *Forest Science*, vol. 65, no. 3, pp. 355-362, doi: 10.1093/forsci/fxy058.

Bracho, R., Vogel, J.G., Will, R.E., Noormets, A., Samuelson, L.J., Jokela, E.J., Gonzalez-Benecke, C.A., Gezan, S.A., Markewitz, D., Seiler, J.R., Strahm, B.D., Teskey, R.O., Fox, T.R., Kane, M.B., Laviner, M.A., McElligot, K.M., Yang, J., Lin, W., Meek, C.R., Cucinella, J., Akers, M.K., Martin, T.A. (2018) Carbon accumulation in loblolly pine plantations is increased by fertilization across a soil moisture availability gradient, *Forest Ecology and Management*, vol. 424, pp. 39-52, doi: 10.1016/j.foreco.2018.04.029.

Cavard, X., Bergeron, Y., Chen, H.Y.H., Paré, D., Laganière, J., Brassard, B. (2011) Competition and facilitation between tree species change with stand development, *Oikos*, vol. 120, pp. 1683-1695, doi: 10.1111/j.1600-0706.2011.19294.x.

Chertov, O., Komarov, A., Shaw, C., Bykhovets, S., Frolov, P., Shanin, V., Grabarnik, P., Pripulina, I., Zubkova, E., Shashkov, M. (2017a) Romul_Hum – A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity, *Ecological Modelling*, vol. 345, pp. 125-139, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.024.

Chertov, O., Shaw, C., Shashkov, M., Komarov, A., Bykhovets, S., Shanin, V., Grabarnik, P., Frolov, P., Kalinina, O., Pripulina, I., Zubkova, E. (2017b) Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. III. Parameterisation of earthworm activity, *Ecological Modelling*, vol. 345, pp. 140-149, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.06.013.

Jia, Y., Yu, G., Gao, Y., He, N., Wang, Q., Jiao, C., Zuo, Y. (2016) Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based

measurements, *Nature Scientific Reports*, vol. 6, paper ID 19810, doi: 10.1038/srep19810.

Komarov, A., Chertov, O., Bykhovets, S., Shaw, C., Nadporozhskaya, M., Frolov, P., Shashkov, M., Shanin, V., Grabarnik, P., Pripulina, I., Zubkova, E. (2017a) Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing, *Ecological Modelling*, vol. 345, pp. 113-124, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007.

Komarov, A.S., Chertov, O.G., Zudin, S.L., Nadporozhskaya, M., Mikhailov, A., Bykhovets, S., Zudina, E., Zoubkova, E. (2003) EFIMOD 2 – A model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems, *Ecological Modelling*, vol. 170, no. 2-3, pp. 373-392, doi: 10.1016/S0304-3800(03)00240-0.

Komarov, A.S., Ginzul, L.K., Shanin, V.N., Bykhovets, S.S., Bobkova, K.S., Kuznetsov, M.A., Manov, A.V., Osipov, A.F. (2017b) Pattern of biomass partitioning into fractions of boreal trees, *Biology Bulletin*, vol. 44, no. 6, pp. 626-633, doi: 10.1134/S1062359017060061.

Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I., Xu, X. (2009) Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling, *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 41, no. 2, pp. 210-219, doi: 10.1016/j.soilbio.2008.10.016.

Lehmann, J., Kleber, M. (2015) The contentious nature of soil organic matter, *Nature*, vol. 528, pp. 60-68, doi: 10.1038/nature16069.

Masera, O.R., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G.J., Pussinen, A., de Jong, B.H.J., Mohren, G.M.J. (2003) Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach, *Ecological Modelling*, vol. 164, no. 2-3, pp. 177-199, doi: 10.1016/S0304-3800(02)00419-2.

Mayer, M., Prescott, C.E., Abaker, W.E.A., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G.W.D., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J.-P., Laganière, J., Nouvellon, Y., Paré, D., Stanturf, J.A., Vanguelova, E.I., Vesterdal, L. (2020) Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis, *Forest Ecology and Management*, vol. 466, paper ID 118127, doi: 10.1016/j.foreco.2020.118127.

Ontl, T.A., Janowiak, M.K., Swanston, C.W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., Hagenbuch, S., Handrick, C., Mccarthy, L., Patch, N. (2020) Forest management for carbon sequestration and climate adaptation, *Journal of Forestry*, vol. 118, no. 1, pp. 86-101, doi: 10.1093/jofore/fvz062.

Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J.P., Paruelo, J.M. (2008) How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, vol. 216, no. 3, pp. 316-322, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006.

Pretzsch, H. (2014) Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands, *Forest Ecology and Management*, vol. 327, pp. 251-264, doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.027.

Shanin, V.N., Grabarnik, P.Ya., Shashkov, M.P., Ivanova, N.V., Bykhovets, S.S., Frolov, P.V., Stamenov, M.N. (2020) Crown asymmetry and niche segregation as an adaptation of trees to competition for light: Conclusions from simulation experiments in mixed boreal stands, *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 26-49, doi: 10.5281/zenodo.3759256.

Shanin, V., Mäkipää, R., Shashkov, M., Ivanova, N., Shestibratov, K., Moskalenko, S., Rocheva, L., Grabarnik, P., Bobkova, K., Manov, A., Osipov, A., Burnasheva, E., Bezrukova, M. (2015) New procedure for the simulation of belowground competition can improve the performance of forest simulation models, *European Journal of Forest Research*, vol. 134, pp. 1055-1074, doi: 10.1007/s10342-015-0909-8.

References

Bogorodskaya, A.V., Ivanova, G.A. (2011) Mikrobiologicheskij monitoring sostoyaniya pochv posle pozharov v sosново-listvennichnyh nasazhdeniyah nizhnego Priangar'ya [Microbiological monitoring of the state of soils after fires in pine-larch plantations of the lower Angara region], *Hvojnye boreal'noj zony*, vol. XXVIII, no. 1-2, pp. 98-106.

Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N., Trofimenko, L.T., Shvec, N.V. (2022) *Opisanie massiva dannyh srednemesyachnoj temperatury vozduha na stanciyah Rossii* [Description of the data array of average monthly air temperature at stations in Russia], available at: <http://meteo.ru/data/156-temperature> (accessed on 14.06.2022).

Byhovec, S.S., Komarov, A.S. (2002) Prostoј statisticheskij imitator klimata pochvy s mesyachnym shagom [Simple statistical soil climate simulator with monthly steps], *Pochvovedenie*, no. 4, pp. 443-452.

Grabarnik, P.Ya., Chertov, O.G., Chumachenko, S.I., Shanin, V.N., Hanina, L.G., Bobrovskij, M.V., Byhovec, S.S., Frolov, P.V. (2019) Integraciya imitacionnyh modelej dlya kompleksnoj ocenki ekosistemnyh uslug lesov: metodicheskie podhody [The integration of simulation models for complex evaluation of different forest ecosystem services: Methodological approaches], *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*, vol. 14, no. 2, pp. 488-499, doi: 10.17537/2019.14.488.

Grozovskaya, I.S., Hanina, L.G., Smirnov, V.E., Bobrovskij, M.V., Romanov, M.S., Gluhova, E.M. (2015) Biomassa napochvennogo pokrova v elovyh lesah Kostromskoj oblasti [Biomass of the ground cover in the spruce forests of the Kostroma region], *Lesovedenie*, no. 1, pp. 63-76.

Zamolodchikov, D.G., Nikitina, A.D. (2022) Potencial lesoklimaticheskikh proektov v aridnyh regionah Rossii [Potential of forest climatic projects in arid regions of Russia], *Nauchnye osnovy ustojchivogo upravleniya lesami: Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 30-letiyu CEPL RAN, Moskva, 25-29 aprelya 2022 goda*

[Scientific Basis of Sustainable Forest Management: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation dedicated to the 30th anniversary of the CEPF RAS, Moscow, April 25-29, 2022], Moscow, Russia, pp. 220-222.

Zinchenko, S.I. (2018) *Harakteristika ot del'nyh fizicheskikh i pochvenno-gidrologicheskikh svojstv metrovogo profilya seroj lesnoj pochvy* [Characterization of individual physical and soil-hydrological properties of the 1-m profile of grey forest soil], *Vladimirskij zemledec*, no. 1(83), pp. 2-5, doi: 10.24411/2225-2584-2018-00001.

Il'in, B.M., Bulygina, O.N., Bogdanova, E.G., Veselov, V.M., Gavrilova, S.Yu. (2022) *Opisanie massiva mesyachnyh summ osadkov, s ustraneniem sistemicheskikh pogreshnostej osadkomernyh priborov* [Description of the array of monthly precipitation sums, with the elimination of systematic errors of precipitation gauges], available at: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistemicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov> (accessed on 14.06.2022).

Korotkov, V.N. (2016) *Koncepciya vosstanovleniya raznovozrastnyh polidominantnyh hvojno-shirokolistvennyh lesov Vostochnoj Evropy* [The concept of restoration of uneven-aged polydominant coniferous-deciduous forests of Eastern Europe], *Ustojchivoe lesopol'zovanie*, no. 3(47), pp. 2-7.

Korotkov, V.N. (2022) *Lesnye klimaticheskie proekty v Rossii: ogranicheniya i vozmozhnosti* [Forest climate projects in Russia: limitations and opportunities], *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, vol. 7(4), pp. 1-8, doi: 10.21685/2500-0578-2022-4-3.

Lipka, O.N., Zamolodchikov, D.G., Kaganov, V.V., Mazmanyanc, G.A., Isupova, M.V., Alejnikov, A.A. (2021) *Klimaticheskij effekt vosstanovleniya lesov v del'te r. Ili* [Climatic effect of forest restoration in the delta of the Ili river], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, vol. 85, no. 4, pp. 579-594, doi: 10.31857/S2587556621040051.

Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva v lesnyh ekosistemah [Modelling the dynamics of organic matter in forest ecosystems] (2007) V.N. Kudeyarov (ed.), Moscow, Russia, 380 p.

Paavilajnen, E. (1983) *Primenenie mineral'nyh udobrenij v lesu* [The use of mineral fertilizers in the forest], Moscow, Russia, 96 p.

Pobedov, V.S., Bulavik, I.M., Lebedev, E.A. (1984) *Otechestvennyj opyt udobreniya lesov: Obzornaya informaciya* [Domestic experience of forest fertilization: Overview information], Moscow, Russia, 26 p.

Sarkisov, O.R., Gurevich, V.A. (2021) *Problemy rossijskogo lesokompleksa i voprosy sovershenstvovaniya lesnogo zakonodatel'stva* [Problems of the Russian timber complex and issues of improving of forest legislation], *Vestnik ekonomiki, prava i sociologii*, no. 1, pp. 88-93.

Siskevich, Yu.I., Nikonorenkov, V.A., Dolgih, O.V., Ahtyrcev, A.B., Sushkov, V.D. (2018) *Pochvy Lipецкой области* [Soils of the Lipetsk region], Lipetsk, Russia, 209 p.

Stepanenko, I.A. (2010) *Intensifikatsiya celevogo vyrashchivaniya sosnovykh nasazhdenij v yuzhno-tayozhnom lesnom rajone tayozhnoj zony evropejskoj chasti Rossii* [Intensification of targeted cultivation of pine plantations in the Southern taiga forest area of the taiga zone of the European part of Russia], Doctor's thesis, Moscow, Russia, 357 p.

Usol'cev, V.A. (2016) *Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchih porod v klimaticheskikh gradientah Evrazii (k menedzhmentu biosfernykh funktsij lesov)* [Biological productivity of forest-forming species in the climatic gradients of Eurasia (towards the management of the biospheric functions of forests)], Yekaterinburg, Russia, 383 p.

Fomenko, G.A., Romanovskaya, A.A., Fomenko, M.A., Loshadkin, K.A., Klimov, E.V., Lipka, O.N., Korotkov, V.N., Aldoshina, A.S. (2022a) Lesnye klimaticheskie proekty: vozmozhnosti i problemy realizatsii ESG-podhoda. Chast' 1 [Forest carbon projects: Opportunities and problems of implementing the ESG principles. Part 1], *Problemy regional'noj ekologii*, no. 2, pp. 91-106, doi: 10.24412/1728-323X-2022-2-91-106.

Fomenko, G.A., Romanovskaya, A.A., Fomenko, M.A., Loshadkin, K.A., Klimov, E.V., Lipka, O.N., Korotkov, V.N., Aldoshina, A.S. (2022b) Lesnye klimaticheskie proekty: vozmozhnosti i problemy realizatsii ESG-podhoda. Chast' 2 [Forest carbon projects: Opportunities and problems of implementing the ESG principles. Part 2], *Problemy regional'noj ekologii*, no. 3, pp. 65-74, doi: 10.24412/1728-323X-2022-3-65-74.

Shanin, V.N., Grabarnik, P.Ya., Byhovec, S.S., Chertov, O.G., Priputina, I.V., Shashkov, M.P., Ivanova, N.V., Stamenov, M.N., Frolov, P.V., Zubkova, E.V., Ruchinskaya, E.V. (2019) Parametrizatsiya modeli produkcionnogo processa dlya dominiruyushchih vidov derev'ev Evropejskoj chasti RF v zadachah modelirovaniya dinamiki lesnykh ekosistem [Parameterization of productivity model for the most common trees species in European part of Russia for simulation of forest ecosystem dynamics], *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*, vol. 14, no. 1, pp. 54-76, doi: 10.17537/2019.14.54.

Shanin, V.N., Frolov, P.V., Korotkov, V.N. (2022a) Vsegda li iskusstvennoe lesosvosstanovlenie mozhet byt' lesoklimaticheskim proektom? [Can artificial reforestation always be a forest climatic project?], *Voprosy lesnoj nauki*, vol. 5, no. 2, paper ID 106, doi: 10.31509/2658-607x-202252-106.

Shanin, V.N., Frolov, P.V., Priputina, I.V., Chertov, O.G., Byhovec, S.S., Zubkova, E.V., Portnov, A.M., Frolova, G.G., Stamenov, M.N., Grabarnik, P.Ya. (2022b) Modelirovanie dinamiki lesnykh ekosistem s uchyotom ih strukturnoj neodnorodnosti na raznykh funktsional'nykh i prostranstvennykh urovnnyakh [Modelling the dynamics of forest ecosystems taking into account their structural heterogeneity]

at different functional and spatial levels], *Voprosy lesnoj nauki*, vol. 5, no. 3, paper ID 112, doi: 10.31509/2658-607x-202252-112.

Shvidenko, A.Z., Shchepashchenko, D.G., Nil'sson, S., Buluj, Yu.I. (2008) *Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazuyushchih porod Severnoj Evrazii (normativno-spravochnye materialy). 2-e izd.* [Tables and models of growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (regulatory reference materials). 2nd ed.], Moscow, Russia, 886 p.

Sherstyukov, A.B. (2022) *Opisanie massiva sutochnyh dannyh o temperature pochvy na glubinah do 320 sm po meteorologicheskim stanciyam Rossijskoj Federacii (versiya 2)* [Description of the array of daily data on soil temperature at depths up to 320 cm for meteorological stations of the Russian Federation (version 2)], available at: <http://meteo.ru/data/164-soil-temperature> (accessed on 14.06.2022).

Shchepashchenko, D.G., Muhortova, L.V., Martynenko, O.V. (2023) *Baza dannyh po primeneniyu mineral'nyh udobrenij v lesnom hozyajstve i ih vliyaniyu na uglerodnyj byudzhel lesov* [Database on the application of mineral fertilizers in forestry and their impact on the carbon budget of forests], available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7693698> (accessed on 14.03.2023).

Albaugh, T.J., Fox, T.R., Cook, R.L., Raymond, J.E., Rubilar, R.A., Campoe, O.C. (2019) Forest fertilizer applications in the southeastern United States from 1969 to 2016, *Forest Science*, vol. 65, no. 3, pp. 355-362, doi: 10.1093/forsci/fxy058.

Bracho, R., Vogel, J.G., Will, R.E., Noormets, A., Samuelson, L.J., Jokela, E.J., Gonzalez-Benecke, C.A., Gezan, S.A., Markewitz, D., Seiler, J.R., Strahm, B.D., Teskey, R.O., Fox, T.R., Kane, M.B., Laviner, M.A., McElligot, K.M., Yang, J., Lin, W., Meek, C.R., Cucinella, J., Akers, M.K., Martin, T.A. (2018) Carbon accumulation in loblolly pine plantations is increased by fertilization across a soil moisture availability gradient, *Forest Ecology and Management*, vol. 424, pp. 39-52, doi: 10.1016/j.foreco.2018.04.029.

Cavard, X., Bergeron, Y., Chen, H.Y.H., Paré, D., Laganière, J., Brassard, B. (2011) Competition and facilitation between tree species change with stand development, *Oikos*, vol. 120, pp. 1683-1695, doi: 10.1111/j.1600-0706.2011.19294.x.

Chertov, O., Komarov, A., Shaw, C., Bykhovets, S., Frolov, P., Shanin, V., Grabarnik, P., Pripulina, I., Zubkova, E., Shashkov, M. (2017a) Romul_Hum – A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity, *Ecological Modelling*, vol. 345, pp. 125-139, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.024.

Chertov, O., Shaw, C., Shashkov, M., Komarov, A., Bykhovets, S., Shanin, V., Grabarnik, P., Frolov, P., Kalinina, O., Pripulina, I., Zubkova, E. (2017b) Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota

activity. III. Parameterisation of earthworm activity, *Ecological Modelling*, vol. 345, pp. 140-149, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.06.013.

Jia, Y., Yu, G., Gao, Y., He, N., Wang, Q., Jiao, C., Zuo, Y. (2016) Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based measurements, *Nature Scientific Reports*, vol. 6, paper ID 19810, doi: 10.1038/srep19810.

Komarov, A., Chertov, O., Bykhovets, S., Shaw, C., Nadporozhskaya, M., Frolov, P., Shashkov, M., Shanin, V., Grabarnik, P., Pripulina, I., Zubkova, E. (2017a) Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing, *Ecological Modelling*, vol. 345, pp. 113-124, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007.

Komarov, A.S., Chertov, O.G., Zudin, S.L., Nadporozhskaya, M., Mikhailov, A., Bykhovets, S., Zudina, E., Zoubkova, E. (2003) EFIMOD 2 – A model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems, *Ecological Modelling*, vol. 170, no. 2-3, pp. 373-392, doi: 10.1016/S0304-3800(03)00240-0.

Komarov, A.S., Ginzul, L.K., Shanin, V.N., Bykhovets, S.S., Bobkova, K.S., Kuznetsov, M.A., Manov, A.V., Osipov, A.F. (2017b) Pattern of biomass partitioning into fractions of boreal trees, *Biology Bulletin*, vol. 44, no. 6, pp. 626-633, doi: 10.1134/S1062359017060061.

Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I., Xu, X. (2009) Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling, *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 41, no. 2, pp. 210-219, doi: 10.1016/j.soilbio.2008.10.016.

Lehmann, J., Kleber, M. (2015) The contentious nature of soil organic matter, *Nature*, vol. 528, pp. 60-68, doi: 10.1038/nature16069.

Masera, O.R., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G.J., Pussinen, A., de Jong, B.H.J., Mohren, G.M.J. (2003) Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach, *Ecological Modelling*, vol. 164, no. 2-3, pp. 177-199, doi: 10.1016/S0304-3800(02)00419-2.

Mayer, M., Prescott, C.E., Abaker, W.E.A., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G.W.D., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J.-P., Laganière, J., Nouvellon, Y., Paré, D., Stanturf, J.A., Vanguelova, E.I., Vesterdal, L. (2020) Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis, *Forest Ecology and Management*, vol. 466, paper ID 118127, doi: 10.1016/j.foreco.2020.118127.

Ontl, T.A., Janowiak, M.K., Swanston, C.W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., Hagenbuch, S., Handrick, C., Mccarthy, L., Patch, N. (2020) Forest management for carbon sequestration and climate adaptation, *Journal of Forestry*, vol. 118, no. 1, pp. 86-101, doi: 10.1093/jofore/fvz062.

Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J.P., Paruelo, J.M. (2008) How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, vol. 216, no. 3, pp. 316-322, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006.

Pretzsch, H. (2014) Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands, *Forest Ecology and Management*, vol. 327, pp. 251-264, doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.027.

Shanin, V.N., Grabarnik, P.Ya., Shashkov, M.P., Ivanova, N.V., Bykhovets, S.S., Frolov, P.V., Stamenov, M.N. (2020) Crown asymmetry and niche segregation as an adaptation of trees to competition for light: Conclusions from simulation experiments in mixed boreal stands, *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 26-49, doi: 10.5281/zenodo.3759256.

Shanin, V., Mäkipää, R., Shashkov, M., Ivanova, N., Shestibratov, K., Moskalenko, S., Rocheva, L., Grabarnik, P., Bobkova, K., Manov, A., Osipov, A., Burnasheva, E., Bezrukova, M. (2015) New procedure for the simulation of belowground competition can improve the performance of forest simulation models, *European Journal of Forest Research*, vol. 134, pp. 1055-1074, doi: 10.1007/s10342-015-0909-8.

Поступила в редакцию: 21.02.2023.

Доработана после рецензирования: 13.04.2023.

Для цитирования / For citation:

Шанин, В.Н., Фролов, П.В., Коротков, В.Н. (2023) Предварительная валидация лесоклиматических проектов с использованием прогнозного имитационного моделирования, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 1-2, с. 66-91, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-66-91.

Shanin, V.N., Frolov, P.V., Korotkov, V.N. (2023) Preliminary validation of forest climatic projects with predictive simulation modelling, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no. 1-2, pp. 66-91, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-66-91.

Анализ практики достижения этнокохозяйственного консенсуса на основе моделирования переговорного процесса

О.В. Максимова^{1),2)}, И.З. Аронов³⁾, Н.В. Еремеева³⁾*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля,
Россия, 107058, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ НИТУ «МИСиС»,
Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-кт, 4

³⁾ МГИМО (У),
Россия, 119454, г. Москва, проспект Вернадского, 76

*Адрес для переписки: *o-maximova@yandex.ru*

Реферат. Территории Севера и Дальнего Востока РФ, подвергшиеся промышленному воздействию, служат объектом противоречия интересов коренных народов и промышленных компаний. В работе построены математические модели, которые демонстрируют выходы на достижение консенсуса при наличии конфликта между сторонами переговоров. Показано, что взаимные послабления или вмешательство неавторитарного эксперта ведут к тому, что между компаниями и общинами коренных народов проводятся переговоры, ведущие к взвешенному консенсусному решению вместо широко распространенных компенсационных выплат. Построенные регрессионные модели показали, что время достижения консенсуса в случае вмешательства эксперта в среднем в 2 раза больше в отличие от случая с взаимными послаблениями. Доказано, что вмешательство неавторитарного эксперта позволяет прийти к решению, учитывающему мнение не только самого эксперта, но и членов группы, в отличие от случая вмешательства авторитарного модератора.

Ключевые слова. Коренные и малочисленные народы, переговорный процесс, консенсус, марковские цепи, математическое моделирование, коалиции.

Analysis of the practice of achieving an ethno-economic consensus based on the modeling of the negotiation process

O.V. Maksimova^{1), 2)}, I.Z. Aronov³⁾, N.V. Ereemeeva³⁾*

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

²⁾ Moscow Institute of Steel and Alloys,
4, Leninsky pr., 119049, Moscow, Russian Federation

³⁾ MGIMO University,
Vernadsky pr., 76, 119454, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *o-maximova@yandex.ru*

Abstract. The territories of the North and the Far East of Russia, subjected to industrial impact, serve as an object of conflict between the interests of indigenous peoples and industrial companies. The paper builds mathematical models that demonstrate ways to reach consensus in the presence of a conflict between the parties to the negotiations. It is shown that concessions or intervention by a non-authoritarian expert lead to negotiations between companies and indigenous communities leading to a weighted consensus decision, instead of widespread compensation payments. The constructed regression models showed that the time to reach consensus in the case of expert intervention is on average 2 times longer, in contrast to the case with mutual concessions. It has been proven that the intervention of a non-authoritarian expert makes it possible to come to a decision that takes into account the opinion of not only the expert himself, but also the members of the group, in contrast to the case of the intervention of an authoritarian moderator.

Keywords. Indigenous peoples, negotiation process, consensus, Markov chains, mathematical modeling, coalitions.

Введение

Один из сложных вопросов развития коренных малочисленных народов (КМН) связан с ростом числа конфликтов между КМН, с одной стороны, и хозяйствующими субъектами (в основном добывающими компаниями и горно-обогатительными комбинатами), – с другой. На сайте ассоциации коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока¹⁾ представлена карта потенциальных конфликтов с промышленными компаниями. Порядка сорока из них затрагивают нефтегазовый сектор экономики, множество конфликтов отмечается также в секторах лесоперерабатывающей промышленности, гидроэнергетики, угольной промышленности и др.

Образование коалиций в таких ситуациях – вполне естественный процесс, обусловленный интересами разных сторон, консенсус в условиях коалиций невозможен (Аронов, Максимова, 2020). Фундаментальная научная задача, возникающая в этих условиях, связана с исследованием природы и способами поиска консенсуса между КМН и хозяйствующими субъектами, обеспечивающего разрешение конфликта между сторонами. Неразрешимую ситуацию с коалициями возможно изменить разными способами: прийти к некоторому компромиссу со стороны одной или обеих коалиций или пригласить внешнего эксперта для модерации переговоров. В первом случае основная идея «снятия» конфликта и достижения консенсуса связана с установлением соглашений и, как правило, предложением послабления требований, которое делает одна сторона конфликта другой стороне, а во втором – с упорядочением переговорного процесса модератором (внешним экспертом).

¹⁾ <https://raipon.info/> (дата обращения 21.12.2022)

Вопросы, связанные с возможностями консенсуса и способами его достижения в переговорном процессе между КМН и компаниями-недропользователями, часто остаются на периферии исследований. Разрешение конфликта с помощью только возмещения ущерба без дальнейшего взаимодействия подтверждает нецелесообразность такого подхода. Как отмечено в работе (Попков, 2001): «через экономические соглашения аборигены удовлетворяют лишь интересы выживания, причем можно сказать, выживания индивидуального (семейного), но не интересы развития, тем более выражающие потребности всего этноса как целого». Этот вывод подтверждается результатами проведенного социологического исследования в Сургутском, Нижневартовском, Нефтеюганском, Белоярском и Кондинском районах ХМАО – Югры – на территориях, где происходит активное взаимодействие представителей КМН и нефтяных компаний (Хакназаров, 2018). Основным мотивом, побуждающим к занятиям традиционными видами хозяйственной деятельности у представителей КМН Севера, является сохранение принятого образа жизни (Хакназаров, 2018). Добывающие компании должны вести диалог по согласованию интересов, нужд коренных народов и сохранению культуры и быта коренного населения, а также традиционного природопользования и, помимо этого, договариваться с ними о возмещении ущерба по единому сценарию (Кряжков, 2014).

Примером первого подхода достижения компромиссов могут служить заключаемые между компаниями и коренным населением соглашения, которые становятся все более распространенными в мире. Коренные народы ожидают от компаний развития диалога и консультаций на самых ранних стадиях планирования проекта, укрепления доверия, открытость и обмен информацией, проведение независимых экологических экспертиз и переход от игнорирования интересов КМН к партнерству и совместному принятию решений.

К такому соглашению пытаются, например, прийти в рамках проекта разработки месторождения платиноидов «Федоровы тундры»²⁾ с учетом потребностей коренных малочисленных народов (саами), которые традиционно используют данную территорию в качестве оленьих пастбищ (Аксенова, 2020). В конце 2020 г. Госкомиссия по вопросам развития Арктики поддержала создание проекта по разработке месторождения платиновой группы. Но в Федорово-Панских тундрах находятся олени пастбища и священные для народа саами места, его культурное наследие³⁾. В октябре 2020 г. директор Фонда саамского наследия и развития Андрей Данилов (Вуадтер Вуэннэтры Данилов) написал открытое обращение в администрацию Мурманской области с призывом к компаниям СП «Ростеха»⁴⁾, и «Ростех» начать процедуру добросовестной консультации с местным населением и саами²⁾. В ноябре

²⁾ <https://arctic-russia.ru/project/osvoenie-mestorozhdeniya-fedorova-tundra-kolskiy-variant-klondayka/> (дата обращения 21.03.2022)

³⁾ <https://kolasapmi.com/2020/06/21/2020-30/> (дата обращения 21.03.2022)

⁴⁾ <https://tass.ru/ekonomika/8849733> (дата обращения 21.05.2022)

2020 г. в ответ на обращение Андрея Данилова получен ответ от Минэкономразвития Мурманской области, в котором помимо графика реализации работ и проведения независимой экспертизы проекта говорится, что с целью выстраивания эффективного диалога с местным сообществом, участники проекта «Федорова Тундра» рассчитывают на тесное взаимодействие с Советом представителей коренных народов Севера при Правительстве Мурманской области. На данный момент ситуация находится на контроле общественности.

В случае отсутствия компромисса частым способом решения конфликта служит второй подход, связанный с необходимостью приглашения внешнего эксперта, который, как ожидается, будет обеспечивать максимальную открытость переговорного процесса и снятие конфликтных ситуаций (Аксенова, 2020). Примером привлечения внешнего эксперта служит переговорный процесс между представителями компании «Сахалин Энерджи» и коренными народами. Широкие протесты начались в 2005 г. в связи с необходимостью сохранения исконной среды обитания и традиционного природопользования при реализации проектов по добыче и транспортировке нефти и газа. В результате акции протеста «Зеленая волна»⁵⁾ со стороны КМН была создана региональная общественная организация «Региональный Совет уполномоченных представителей коренных малочисленных народов Севера Сахалинской области»⁶⁾, которая представляет собой коалицию из восьми членов четырех основных групп коренных народов Сахалина. Ее требования обеспечить защиту исконной среды обитания, традиционного образа жизни КМН при осуществлении промышленных проектов в местах их проживания, не были услышаны ни нефтяными компаниями, ни областной администрацией. Консенсус в ходе переговоров не был достигнут. Но при запросе финансирования проекта со стороны «Сахалин Энерджи» Европейский банк реконструкции и развития (ЕБРР)⁷⁾ оказал давление на компанию, чтобы та, в свою очередь, заключила соглашение с коренными народами на предмет их участия на всех этапах проекта (Lamers et al., 2018). Банк ЕБРР был основан в 1991 г. с целью привлечения новых инвестиций в частный сектор и развития рыночной экономики в Восточной Европе, России и Центральной Азии. Таким образом, банк ЕБРР выступил внешним экспертом переговорного процесса для достижения консенсуса. Сложившиеся обстоятельства побудили компанию «Сахалин Энерджи» к широкому взаимодействию с коренными народами и разработке в 2006 г. социальных программ⁸⁾. Благодаря действиям представителей банка ЕБРР в сложившейся ситуации были достигнуты послабления со

⁵⁾<https://wwf.ru/what-we-do/ekoregulirovanie/legalmethods/aktsiya-protesta-v-zashchitu-prav-korennykh-malochislennykh-narodov-zelenaya-volna/> (дата обращения 28.03.2022)

⁶⁾<https://sakhalin.gov.ru/index.php?id=1044> (дата обращения 09.02.2022)

⁷⁾<https://www.ebrd.com/ru/home.html> (дата обращения 08.09.2022)

⁸⁾<http://www.sakhalinenergy.ru/ru/social/programmes/simdp/> (дата обращения 08.09.2022)

стороны нефтегазовой компании, диапазон и глубина консультаций с группами коренных народов стали расширяться. Консенсус был достигнут, а принимаемые консенсусные решения являются коллективным результатом взаимодействия всех сторон благодаря действиям внешнего эксперта.

В случае отсутствия поиска компромисса между коалициями или отсутствия внешнего вмешательства переговоры могут затягиваться на годы и консенсус не будет достижим. Ярким примером такой ситуации служит конфликт в Панаме между КМН и компанией *Generador del Istmo S. A. (GENISA)*⁹⁾ при строительстве гидроэлектростанции. После многомесячных дебатов, обусловленных неприятием компанией требований общин, в августе 2015 года правительство решило начать новые переговоры, изменив состав группы переговорщиков, вручную выбрав новых участников для представления общин, исключая сами затронутые общины. Действительно, такой способ замены группы из коалиций переговорщиков на группу без наличия коалиций может привести к консенсусу. Но в ситуации с конфликтом в Панаме общины, пострадавшие от плотин, осудили эти соглашения как незаконные, поскольку с ними не проводились консультации, и они не были включены в проект.

Отметим, что изучение консенсуса на практике ставит множество вопросов, связанных с обеспечением воспроизводимости результатов исследования. Проведенный анализ коллаборации доказательных психологов показал, что из 100 оригинальных экспериментальных исследований в области социальной психологии лишь некоторым группам удалось воспроизвести не более 39 экспериментов (*Open science...*, 2015). Таким образом, организовать социопсихологические исследования природы консенсуса для больших групп не представляется возможным. Феномен достижения консенсуса возможно проанализировать на основе методологии моделирования, которая не ограничена числом участников группы. «Хорошая» математическая консенсусная модель, использующая имитационное моделирование, свободна от этих системных дефектов.

Задачи настоящего исследования: разработать математические модели переговорного процесса, приводящие к консенсусу в условиях коалиций на основе марковских цепей; провести сравнительный анализ скорости достижения консенсуса для каждой модели переговоров и влияющих на это факторов, а также исследовать структуру консенсусного решения; обобщить полученные результаты в рамках Соглашений о возмещении убытков, заключаемых хозяйствующими субъектами и советами представителей КМН.

Выявленные закономерности и принципы переговорного процесса в ходе исследования позволят вывести потенциальные конфликты между КМН и хозяйствующими субъектами на более цивилизованный гуманистический уровень.

⁹⁾<https://www.culturalsurvival.org/publications/cultural-survival-quarterly/underwater-barroblanco-displaces-three-ngabe-bugle> (дата обращения 23.09.2022)

Математическая модель достижения консенсуса

Теоретическая модель достижения консенсуса, построенная на регулярных марковских цепях, предложена авторами в 2015 г. (Аронов и др., 2015). Модель основана на предположении, что члены группы переговорщиков являются специалистами в обсуждаемом вопросе. В этой модели введены следующие общие обозначения: n – число членов группы переговорщиков; начальные мнения членов группы задаются вектором $S(0) = (s_{01}, s_{02}, \dots, s_{0n})$, где s_{0i} – начальное мнение i -го члена. Члены группы обмениваются мнениями на каждом этапе переговорного процесса, в результате чего могут изменяться компоненты этого вектора при изменении мнения одного или нескольких участников. Другими словами, если каждому члену группы известны мнения других членов, то для него естественно изменить свое субъективное мнение по обсуждаемому вопросу, учитывая доводы других членов группы. Вводится вероятность доверия i -го члена к мнению j -го участника $0 < p_{ij} < 1$ ($i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, n$) и тем самым формируется переходная квадратная матрица доверия $P = (p_{ij})$, в которой для любого $i \in \overline{1, n}$ выполняется $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$ (т.е. матрица стохастическая и удовлетворяет условию регулярности).

В результате первого согласования рассчитывается новый вектор мнений $S(1)$ по формуле $S^T(1) = PS^T(0) = (S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1n})^T$, т.е. предполагается, что когда член группы пересматривает свое мнение, то его новое мнение будет линейной комбинацией мнений остальных членов группы (например, первая компонента нового вектора мнений после первого согласования равна $s_{11} = p_{11} \cdot s_{01} + p_{12} \cdot s_{02} + \dots + p_{1n} \cdot s_{0n}$). В результате k -го согласования вектор мнений будет

$$S^T(k) = P^k \cdot S^T(0).$$

Процесс завершается на m -ом шаге, когда все строки матрицы P^m становятся одинаковыми и итоговая матрица доверия P достигает финальной матрицы F , в которой все соответствующие построчные элементы равны. При последующих согласованиях матрица P не будет меняться, вследствие чего не будет изменяться и вектор мнений переговорщиков $S^T(m) = P^m \cdot S^T(0) = (s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mn})^T$, т.е. наступает консенсус.

В работе используется теоретическая модель достижения консенсуса при условии, что в переговорах участвуют две коалиции (Аронов, Максимова, 2020). Коалиции в такой модели для группы из переговорщиков описываются двумя блоками из l и $(n - 1)$ членов

$$\begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} p_{11} & \dots & p_{1l} \\ \dots & \dots & \dots \\ p_{l1} & \dots & p_{ll} \end{matrix}} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} p_{(l+1)1} & \dots & p_{(l+1)n} \\ \dots & \dots & \dots \\ p_{(l+1)n} & \dots & p_{nn} \end{matrix} \end{pmatrix}$$

где для первой коалиции $\sum_{j=1}^l p_{ij} = 1$ для любого $1 \leq i \leq l$ и $p_{ij} = 0$ для всех

$l < j \leq n$; для второй коалиции $\sum_{j=l+1}^n p_{ij} = 1$ для любого $l+1 \leq i \leq n$ и $p_{ij} = 0$ и для всех $1 \leq j \leq n$.

Вероятности $0 < p_{ij} < 1$ ($1 \leq i, j \leq n$) при формировании матрицы доверия \mathbf{P} в среде *Excel 2016* моделировались равномерным законом распределения. Оценка значимости различий, полученных в результате моделирования значений для числа согласований (при фиксированных уровнях факторов), проводилась на уровне значимости $\alpha = 5\%$ при помощи критерия Стьюдента (Тьюки, 1981).

Результаты и их обсуждение

В результате переговоров образование коалиций – естественный процесс формирования интересов разных сторон. Построенную в работе (Аронов, Максимова, 2020) и описанную выше математическую модель с двумя коалициями рассмотрим на примере группы из четырех членов:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Матрицу \mathbf{P} из двух равночисленных коалиций примера (1) можно интерпретировать следующим образом: в каждой из них 1-й участник доверяет себе и только 2-му члену своей коалиции. При такой матрице доверия \mathbf{P} консенсус невозможен ввиду нарушений условий ее сходимости к финальной матрице \mathbf{F} . Необходимым и достаточным условием сходимости (достижения консенсуса) при любом векторе исходных мнений является регулярность¹⁰⁾ матрицы \mathbf{P} : сумма по строкам матрицы \mathbf{P} должна быть равна 1 и при этом для каких-либо строк для вероятностей p_{ij} должно выполняться строгое неравенство $0 < p_{ij} < 1$ (Гантмахер, 2004). В условиях коалиций в каждой строке присутствуют нулевые значения p_{ij} , описывающие недоверие членам другой коалиции, поэтому условие регулярности нарушается, консенсус невозможен.

Устранить сложившуюся ситуацию в условиях коалиций возможно за счет выбора компромисса, который можно обеспечить как изменением системы (матрицы) изнутри, так и извне. В первом случае это может быть связано с послаблением (цессией) со стороны одной/обеих коалиций за счет дополнительной аргументации, а во втором – с приглашением внешнего эксперта (модератора).

1. Математическая модель с послаблением в коалициях

Математическая модель с послаблением рассматривалась авторами в работах (Аронов, Максимова, 2020; Максимова, Аронов, 2022), основные аспекты

¹⁰⁾ Матрицы, суммы элементов всех строк которых равны единице, называются **стохастическими**. Если при некотором n все элементы матрицы \mathbf{P}^n не равны нулю, то такая матрица переходов называется **регулярной**

этой модели следующие: пусть одна коалиция приводит дополнительную аргументацию в процессе обсуждения, которую готова принять вторая коалиция, тогда в математической модели перераспределяются вероятности доверия i -го эксперта одной коалиции j -му эксперту второй коалиции. Сложившаяся ситуация (перераспределение вероятностей доверия) есть послабление. В работе социального психолога Д. Хоманса предложена подобная схема функционирования малых социальных групп, в которой человеческое поведение в социальной среде является непрерывным обменом послаблениями (Homans, 1958).

Моделирование этого случая проводилось для группы из 20 членов, представляющей собой две коалиции разной численности. Общее число членов – не более 20 – оптимально с точки зрения числа согласований: при большем количестве членов группы наступление консенсуса существенно затягивается при прочих равных условиях (Zazhifalkin et al., 2019). Для оценки влияния соотношения числа членов двух коалиций на число заседаний до достижения консенсуса введен индекс влияния коалиций, равный отношению числа членов большей по численности коалиции к меньшей. На практике это можно интерпретировать как количественную «силу» одной коалиции по отношению к другой. Моделирование вероятностей доверия матрицы \mathbf{P} проводилось равномерным законом распределения с последующей нормировкой для обеспечения свойства стохастичности матрицы \mathbf{P} . Варьирование индекса и величины послабления со стороны малочисленной коалиции для каждого набора моделирований дало следующие содержательные результаты:

- с ростом величины послабления наблюдается существенный спад числа согласований, т.е. высокая чувствительность числа согласований к величине послабления;

- наблюдается статистически незначимое (на уровне $\alpha = 5\%$) влияние размера коалиции, делающей послабление больше 10%, на среднее число согласований (чем больше наблюдалось различий в соотношении числа членов коалиций, тем больше фиксировалось расхождений в среднем числе согласований несмотря на то, что эти различия оказались статистически не значимы). Таким образом, нивелируется значимость различий по числу членов.

Дополнительное моделирование для случая послабления со стороны многочисленной коалиции в работе (Maksimova, Aronov, 2021) показало, что факт, какая коалиция ее делает – малочисленная или многочисленная, несущественно сказывается на среднем числе согласований.

Приведем демонстрацию результатов на примере (1) для послабления в 20%. Матрица доверия \mathbf{P} после послабления членами первой коалиции преобразуется в $\tilde{\mathbf{P}}$:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \end{pmatrix} \Rightarrow \tilde{\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} 0.48 & 0.32 & 0.1 & 0.1 \\ 0.16 & 0.64 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \end{pmatrix}.$$

Это означает, что коалиция из двух членов «передает» вероятность своего доверия 0.2, которая в равных долях «распределяется» среди членов второй коалиции. Считая от этого момента, через 22 шага (согласования) матрица доверия сходится к финальной матрице $\mathbf{F} = \mathbf{P}^{22}$ с заданной точностью округления ее элементов $\varepsilon = 0.01$:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.60 & 0.60 \\ 0 & 0 & 0.60 & 0.60 \\ 0 & 0 & 0.60 & 0.60 \\ 0 & 0 & 0.60 & 0.60 \end{pmatrix}.$$

Результаты вычислений для примера (1) при разных уровнях послабления представлены на рис. 1, из которого виден спад числа согласований при увеличении послабления: после 40%-го послабления потребуется 11 шагов, а для 60%-го – лишь 7.

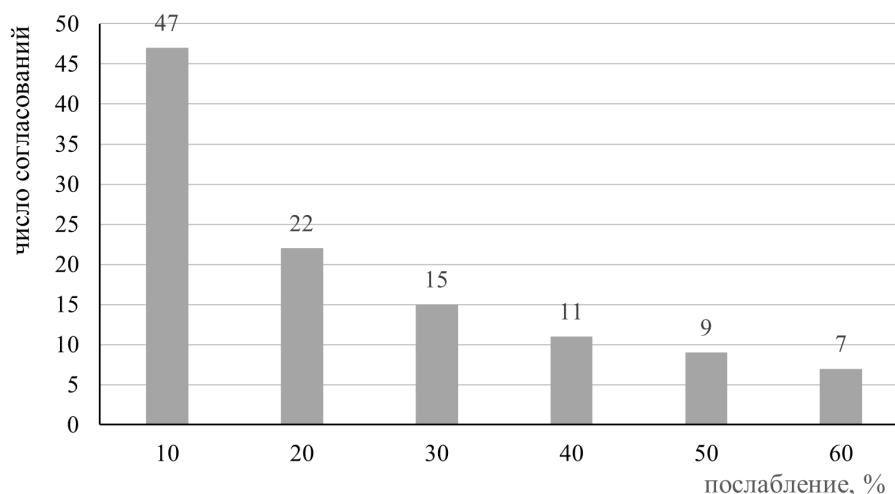


Рисунок 1. Диаграмма зависимости числа согласований от послабления с равночисленными коалициями для примера (1)

Picture 1. Diagram of the dependence of the number of agreements on concessions with equal coalitions for example (1)

Таким образом, даже незначительная цессия приводит к консенсусу несмотря на то, что число согласований при этом растет нелинейно. Однако, в отличие от двустороннего, в случае одностороннего послабления, как видно из примера (1), консенсусное решение определяется вкладом коалиции, которая приняла его после некоторой аргументации. Поэтому для внесения равновесного вклада всех членов группы в консенсусное решение, предпочтительно, чтобы обе коалиции пошли навстречу друг другу при обсуждении.

2. Математическая модель при наличии внешнего эксперта

Построим математическую модель с двумя коалициями при вмешательстве внешнего эксперта. Будем придерживаться предпосылки, что эксперт может быть как авторитарным, так неавторитарным. В первом случае его уровень

доверия к своему мнению равен 1, а во втором – 0.5, при этом он равноправно разделяет оставшуюся часть между членами группы. Продемонстрируем эти ситуации для примера (1) с заданной точностью округления ее элементов $\varepsilon = 0.01$. В случае вмешательства, к примеру, авторитарного внешнего эксперта при уровне доверия ему со стороны членов обеих коалиций $Y = 20\%$ (аналогия послабления, но в отношении внешнего эксперта со стороны обеих коалиций) матрица доверия \mathbf{P} преобразуется в $\tilde{\mathbf{P}}$:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \end{pmatrix} \Rightarrow \tilde{\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} 0.48 & 0.32 & 0.1 & 0.1 \\ 0.16 & 0.64 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \end{pmatrix}.$$

Заметим, что каждая коалиция отдает часть доверия лишь внешнему эксперту, но не второй коалиции. На рис. 2 представлена сравнительная диаграмма числа согласований для примера (1) в разных условиях: одна коалиция делает послабление, обе коалиции делают послабление, присутствует авторитарный эксперт и неавторитарный эксперт.

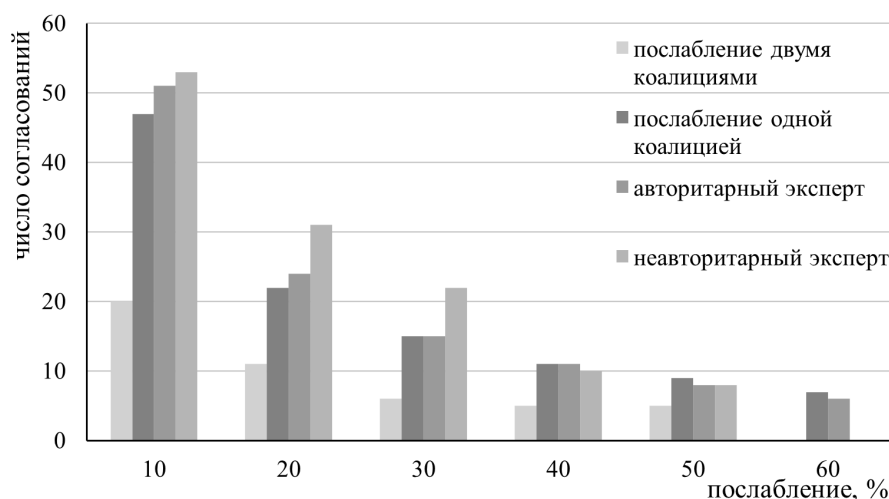


Рисунок 2. Сравнительная диаграмма зависимости числа согласований с равночисленными коалициями от послабления для примера (1) в разных условиях процесса переговоров

Picture 2. Comparative diagram of the dependence of the number of agreements on concessions with equal coalitions for example (1) in different conditions of the negotiation process

Пример (1) показывает, что для такой группы с 4 членами вмешательство неавторитарного эксперта ведет к большему числу согласований в отличие от авторитарного. Это связано с тем, что консенсусное решение, определяемое финальной матрицей \mathbf{F} , будет учитывать мнение каждого участника группы совместно с мнением эксперта, а значит, будет более взвешенным. Ясно, что в случае послаблений со стороны обеих коалиций консенсус достигается наиболее быстро.

Для моделирования общей ситуации и выявления общих закономерностей так же, как и в случае с послаблением коалиций (Maksimova, Aronov, 2021), для сравнительного анализа рассмотрим группу из 20 переговорщиков. Опишем основные этапы моделирования.

На *первом этапе* моделировалась вероятность доверия участников группы к себе p_{ii} при $i = \overline{1;20}$ (т.е. устанавливался уровень авторитарности). Так же, как и в случае с послаблениями, выделены следующие уровни авторитарности: $p_{ii} = 0.20$; $0.59.0 \div 58.0$; $57.0 \div 56.0$; $55.0 \div 54.0$; $03.0 \div$ В каждой формируемой матрице вероятности \mathbf{P} моделировались p_{ii} по равномерному закону распределения, исходя из выбранного уровня авторитарности. Уровень авторитарности p_{ii} , близкий к 0, характеризует поведение конформиста с отсутствием устойчивой позиции в переговорах и, соответственно, перекладыванием ответственности на членов коалиции, а значение p_{ii} , близкое к 1, характеризует поведение человека, почти не склонного к компромиссу. Поведенческие черты разных членов группы нашли отражение в условиях моделирования $0.20 \leq p_{ii} \leq 0.59.0$.

На *втором этапе* выбирался уровень индекса влияния коалиции I , определяемый как отношение числа членов большей по численности коалиции к меньшей. $I = 19$ (коалиции с 19 и 1 участниками); $I = 4$ (коалиции с 16 и 4 членами); $I = 1.5$ (коалиции с 12 и 8 членами); $I = 1$ (по 10 членов каждая).

На *третьем этапе* выбирался уровень авторитарности эксперта $p_{(n+1)(n+1)}$ на двух уровнях: авторитарный с вероятностью $p_{(n+1)(n+1)} = 1$, который будет вести группу к консенсусу, основываясь только на своем мнении, и неавторитарный с $p_{(n+1)(n+1)} = 0.5$, который доверяет равномерно всем членам группы переговорщиков наравне с доверием к себе.

На четвертом этапе выбирался уровень доверия Y внешнему эксперту: $Y = 10\%$; 20% ; 33% ; 50% ; 75% . Каждый такой уровень соответствует уровню послабления, который выбирался для предыдущего случая переговоров без эксперта.

Оценивалось время сходимости матрицы мнений \mathbf{P} к финальной матрице $\mathbf{F} = \mathbf{P}^m$ в зависимости от выбранных параметров. Для получения устойчивых выводов в отношении среднего числа m согласований при изменении других параметров, на каждом фиксированном уровне факторов проводилось 100 моделирований (Efron, Tibshirani, 1991). Всего проведено 160 наборов экспериментов по 100 моделирований в каждом.

Выявлено, что индекс влияния коалиций I не влияет на среднее число согласований m в условиях любых типов переговоров (на рис. 3 представлен случай переговоров с вмешательством неавторитарного эксперта как случай с наибольшими различиями в значениях m).

Совокупные результаты моделирования зависимости среднего числа согласований m от уровня послабления Y представлены на рис. 4. Отметим, что в случае передачи доверия (послабления) обеими коалициями график не представлен для случая $Y = 60\%$, так как при $Y > 50\%$ теряется случай коалиций со своими взглядами по решаемому вопросу (рис. 3). Аналогично, эта ситуация исключена из рис. 2 в примере (1).

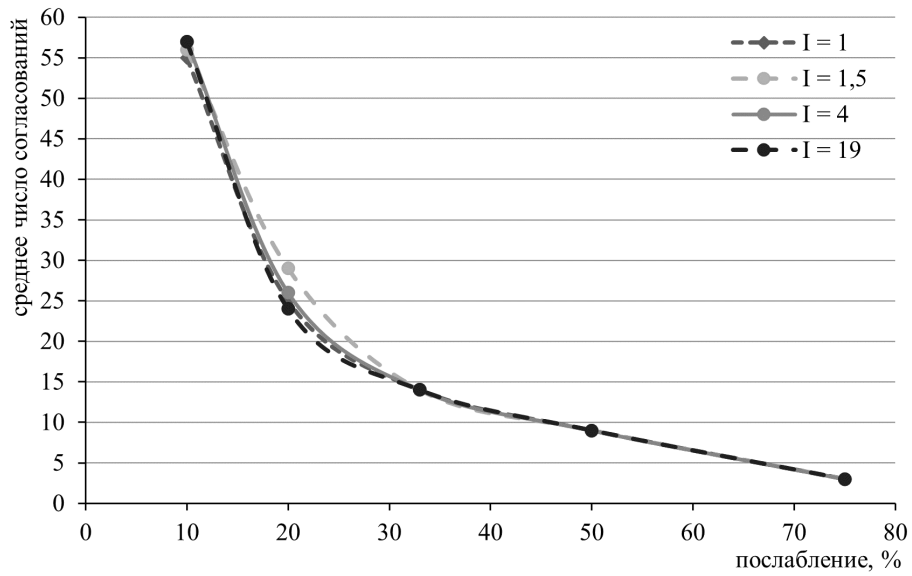


Рисунок 3. Зависимость среднего числа согласований m от индекса влияния коалиций в условиях вмешательства неавторитарного эксперта

Picture 3. Dependence of the average number of approvals m on the coalition influence index I under the intervention of a non-authoritarian expert

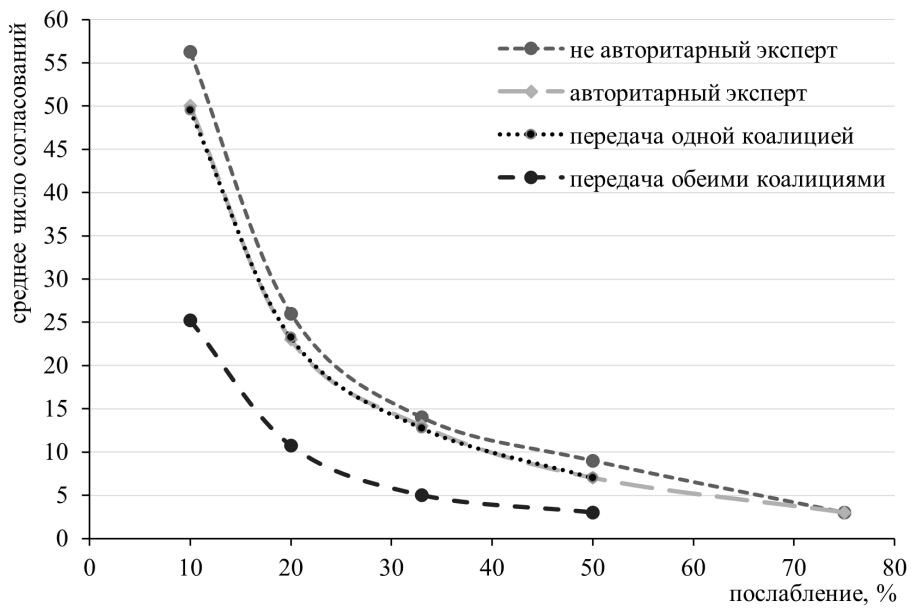


Рисунок 4. Зависимость среднего числа согласований m от уровня послабления в разных условиях процесса переговоров

Picture 4. Dependence of the average number of approvals m on the level of concession Y in different conditions of the negotiation process

Представленные связи носят гиперболический характер, их уравнения с характеристикой тесноты связи с помощью коэффициента детерминации R^2 представлены в табл. 1, они позволяют произвести оценку числа переговоров до достижения консенсуса в зависимости от послабления. Регрессионные коэффициенты из табл. 1 отражают число согласований до достижения консенсуса при фиксированном уровне послабления Y в разных типах переговоров с двумя коалициями. Как показывают модели, в случае наличия внешнего неавторитарного эксперта число согласований будет наибольшим среди всех типов переговоров при равных начальных условиях.

Таблица 1. Регрессионные зависимости среднего числа согласований m от уровня послабления Y

Table 1. Regression dependences of the average number of agreements m on the level of concession Y

тип переговоров	послабление двумя коалициями	послабление одной коалицией	наличие внешнего авторитарного эксперта	наличие внешнего неавторитарного эксперта
уравнение	$\hat{m} = \frac{237}{0.01 \cdot Y}$	$\hat{m} = \frac{480}{0.01 \cdot Y}$	$\hat{m} = \frac{480}{0.01 \cdot Y}$	$\hat{m} = \frac{541}{0.01 \cdot Y}$
	0.985	0.996	0.992	0.992

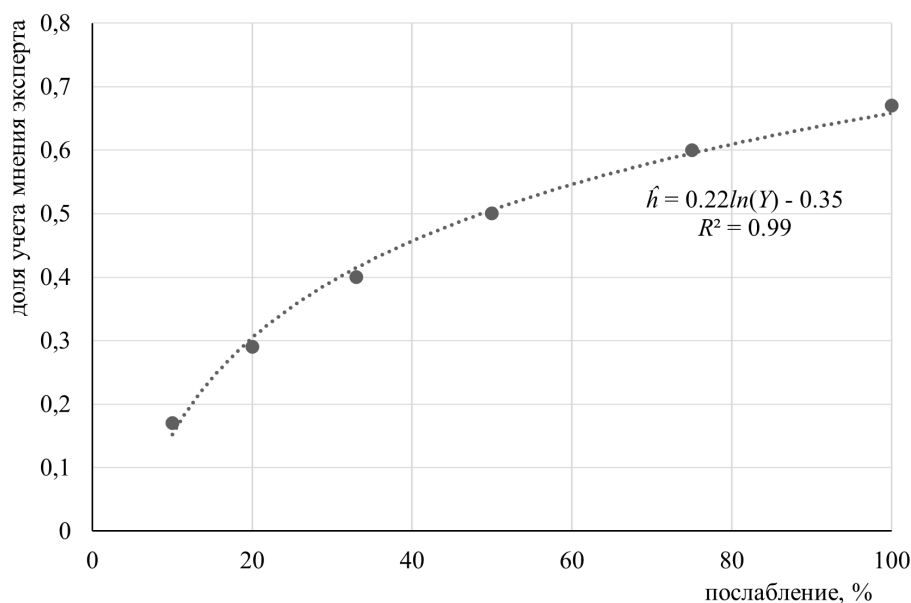


Рисунок 5. Зависимость доли учета мнения эксперта \hat{h} от послабления Y в переговорах с вмешательством неавторитарного эксперта

Picture 5. Dependence of the share of taking into account the expert's opinion \hat{h} on the concession Y in negotiations with the intervention of a non-authoritarian expert

Ясно, что наиболее быстрый способ завершения переговоров с учетом мнений всех членов группы в консенсусном решении – пойти на дополнительную аргументацию со стороны обеих коалиций, которые ими будут приняты (табл. 1). Если же к ситуации послаблений со сторон коалиций путем дополнительной аргументации прийти не удастся, то внешнее вмешательство авторитарного эксперта в отличие от неавторитарного быстрее в среднем приведет к консенсусу группы, но при этом консенсусное решение будет определяться мнением этого эксперта. Поэтому с точки зрения коллективного вклада, целесообразно привлечение эксперта неавторитарного, который приведет группу к взвешенному решению.

На рис. 5 представлен график учета мнения неавторитарного эксперта в коллективное консенсусное решение, составленное на основе результатов моделирования. Важным результатом моделирования служит то, что неавторитарный эксперт не перекладывает полное принятие решений на себя и даже при полном доверии к нему доля учета его мнения составляет около 70% (рис. 5).

Заключение

Отношения КМН с недропользователями, как отмечает профессор Кряжков В.А. (Кряжков, 2014), – это сфера постоянного конфликта (скрытого или явного). Образование коалиций в таких вопросах – вполне естественный процесс, обусловленный интересами сторон, который влечет невозможность достижения консенсуса и требует рассмотрения различных способов ведения переговоров для выхода на консенсусное решение. Отмечено, что снятие конфликта заменой переговорщиков группы с целью устранения коалиций не всегда приводит к ожидаемому консенсусу (Коренные народы..., 2008).

В работе построены математические модели, которые демонстрируют выходы на достижение консенсуса – изменение системы коалиций путем послаблений хотя бы со стороны одной из них или вмешательство внешнего эксперта. Проведенный сравнительный анализ выявил разные достоинства каждого из способов. С точки зрения практики, взаимные послабления или вмешательство неавторитарного эксперта ведут к тому, что между компаниями и общинами коренных народов проводятся переговоры, ведущие к консенсусу, вместо широко распространенных компенсационных выплат. Именно в таком случае консенсусное решение можно считать более взвешенным. При этом в случае вмешательства эксперта время достижения консенсуса в среднем в 2 раза больше в отличие от случая с взаимными послаблениями для группы из 20 человек (см. регрессионные коэффициенты в табл. 1). Даже небольшая цессия влечет в этих ситуациях наступление консенсуса. Увеличение уровня послабления приводит к резкому снижению времени до наступления консенсуса. Показано, что вмешательство неавторитарного эксперта позволяет сформировать консенсусное решение, учитывающее не только мнение самого эксперта, но и членов группы, в отличие от случая вмешательства авторитарного модератора.

Отметим, что, судя по известным публикациям, социальные психологи не исследовали время, затраченное на поиск консенсуса в условиях коалиций¹¹⁾, поэтому полученные в исследовании результаты могут оказаться достаточно полезными. Установленные в работе качественные результаты отражают суть двух конфликтующих Сторон и могут быть полезны в разных прикладных сферах.

Исследование выполнено в рамках научных тем Росгидромета (ФГБУ «ИГКЭ») АААА-А20-120020590066-5 «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику».

Благодарности

Авторы выражают признательность директору Фонда саамского наследия и развития, Данилову А.Ф. за обсуждение проблем коренных народов.

Список литературы

Аксенова, О.В. (2020) *Стратегия развития социокультурного потенциала коренного населения посёлка Лопарская Мурманской области*, Серия: Библиотека коренных народов Севера, М.

Аронов, И.З., Максимова, О.В. (2020) Теоретическое моделирование достижения консенсуса в условиях коалиций на основе регулярных марковских цепей, *Компьютерные исследования и моделирование*, т. 12, с. 1245-1254, doi:10.20537/2076-7633-2020-12-5-1247-1256.

Аронов, И.З., Максимова, О.В., Зажигалкин, А.В. (2015) Исследование времени достижения консенсуса в работе технических комитетов по стандартизации на основе регулярных марковских цепей, *Компьютерные исследования и моделирование*, т. 7, № 3, с. 161-171.

Гантмахер, Ф.Р. (2004) *Теория матриц*, М., ФИЗМАТЛИТ.

Коренные народы и промышленное развитие. Социально-экономические соглашения с добывающими компаниями: от конфликта – к партнерству, от благотворительности – к программам развития. Составители: Суляндзига, Р.В., Максимов, А.А., Крупко, Л.О., Борсук, Е.И. (2008), Серия: Библиотека коренных народов Севера, вып. 12, М.

Кряжков, В.А. (2014) Правовое регулирование отношений между коренными малочисленными народами Севера и недропользователями в Российской Федерации, *Государство и право*, № 7, с. 27-39.

Максимова, О.В., Аронов, И.З. (2022) Моделирование этнохозяйственного консенсуса между хозяйствующими субъектами и Советами представителей коренных и малочисленных народов Севера РФ, *Экологический мониторинг и*

¹¹⁾ Отмечая только, что коалиции тормозят достижение консенсуса

моделирование экосистем, т. XXXIII, № 1-2, с. 49-63, doi:10.21513/0207-2564-2022-1-2-49-63.

Попков, Ю.В. (2001) Народы Севера и нефть: конфликты и компромиссы, М; *Коренные народы. Нефть. Закон, материалы междунар. конф.*, с. 129-132.

Тьюки, Дж. (1981) *Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ*, М., Мир.

Хакназаров, С.Х. (2018) К вопросу о взаимодействии коренных народов Севера и промышленных компаний на примере Югры, *Арктика и Север*, № 30, с. 120-133, doi:10.17238/issn2221-2698.2018.30.120.

Efron, B., Tibshirani, R. (1991) Statistical Data Analysis in the Computer Age, *Science, New Series*, vol. 253, no. 5018, pp. 390-395.

Homans, G.C. (1958) Social Behavior as Exchange, *American Journal of Sociology*, vol. 63, no. 6, pp. 597-606.

Lamers, M., Henry, L.A., Van Tatenhove, J.P.M., Tysiachniouk, M. (2018) Oil and indigenous people in sub-Arctic Russia: rethinking equity and governance in benefit sharing agreements, *Energy Res. Soc. Sci.*, no. 5 (4), pp. 140-152.

Maksimova, O.V., Aronov, I.Z. (2021) Study of Factors Influence on the Variability of Time for Consensus Building in Coalitions Based on Regular Markov Chains, *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, vol. 6, no. 4, pp. 1076-1088, doi:10.33889/IJMEMS.2021.6.4.063.

Open science collaboration. Estimating the reproducibility of psychological science (2015) *Science*, vol. 349, no. 6251.

Zazhigalkin, A.V., Aronov, I.Z., Maksimova, O.V., Papic, L. (2019) Control of consensus convergence in technical committees of standardization on the basis of regular Markov chains model, *Springer India. International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, no. 1, p. 1-8, doi:0.1007/s13198-019-00765-1.

References

Aksonova, O.V. (2020) *Strategiya razvitiya sotsiokul'turnogo potentsiala korenного naseleniya posolka Loparskaya Murmanskoy oblasti* [Strategy for the development of the socio-cultural potential of the indigenous population in the village of Loparskaya, Murmansk region], Seriya: Biblioteka korennykh narodov Severa, Moscow, Russia.

Aronov, I.Z., Maksimova, O.V. (2020) Teoreticheskoye modelirovaniye dostizheniya konsensusa v usloviyakh koalitsiy na osnove regulyarnykh markovskikh tsepey [Theoretical modeling of reaching consensus under conditions of coalitions based on regular Markov chains], *Computer Research and Modeling*, 12(5), pp. 1247-1256. (In Russian). doi:10.20537/2076-7633-2020-12-5-1247-1256.

Aronov, I.Z., Maksimova, O.V., Zazhigalkin, A.V. (2015) Issledovaniye vremeni dostizheniya konsen-susa v rabote tekhnicheskikh komitetov po standartizatsii na osnove regul'yarnykh markovskikh tse-pey [Investigation of the time to reach consensus in the work of technical committees on standardization based on regular Markov chains], *Computer Research and Modeling*, 7(3), pp. 161-171. (In Russian).

Korennyye narody i promyshlennoye razvitiye. Sotsial'no-ekonomicheskoye soglasheniya s dobyvayushchimi kompaniyami: ot konflikta – k partnerstvu, ot blagotvoritel'nosti – k programmam razvitiya [Indigenous peoples and industrial development. Socio-economic agreements with mining companies: from conflict to partnership, from charity to development programs], Sostaviteli: Sulyandziga R. V., Maksimov, A.A., Krupko, L.O., Borsuk, Ye.I. (2008) *Seriya: Biblioteka korennykh narodov Severa*, no. 12, Moscow, Russia.

Maksimova, O.V., Aronov, I.Z. (2022) Modelirovaniye etnokhozyaystvennogo konsensusa mezhdru kho-zyaystvuyushchimi sub"yektami i Sovetami predstaviteley korennykh i malochislennykh narodov Severa RF [Modeling of ethno-economic consensus between economic entities and Councils of representatives of indigenous and small peoples of the North of the Russian Federation], *Ekologicheskyy monitoring i modelirovaniye ekosistem*, vol. XXXIII, no. 1-2, pp. 49-63. (In Russian), doi:10.21513/0207-2564-2022-1-2-49-63.

Gantmakher, F.R. (2004) *Teoriya matrits* [Matrix Theory], FIZMATLIT, Moscow, Russia.

Kryazhkov, V.A. (2014) Pravovoye regulirovaniye otnosheniy mezhdru korennyimi malochislennymi narodami Severa i nedropol'zovatelyami v Rossiyskoy Federatsii [Legal regulation of relations between the indigenous peoples of the North and subsoil users in the Russian Federation], *Gosudarstvo i parvo*, no. 7, pp. 27-39.

Popkov, YU.V. (2001) Narody Severa i nef't': konflikty i kompromissy [Peoples of the North and oil: conflicts and compromises], *Korennyye narody. Nef't'. Zakon: materialy mezhdunar. konf.*, Moscow, Russia, pp. 129-132.

T'yuki, Dzh. (1981) *Analiz rezul'tatov nablyudeniy. Razvedochnyy analiz* [Analysis of the results of observations. Exploratory analysis], Mir, Moscow, Russia.

Khaknazarov, S. KH. (2018) K voprosu o vzaimodeystvii korennykh narodov Severa i promyshlennykh kompaniy na primere Yugry [On the issue of interaction between the indigenous peoples of the North and industrial companies on the example of Yugra], *Arktika i Sever*, no. 30, pp. 120-133, doi:10.17238/issn2221-2698.2018.30.120.

Efron, B., Tibshirani, R. (1991) Statistical Data Analysis in the Computer Age, *Science, New Series*, vol. 253, no. 5018, pp. 390-395.

Homans, G.C. (1958) Social Behavior as Exchange, *American Journal of Sociology*, vol. 63, no. 6, pp. 597-606.

Lamers, M., Henry, L.A., Van Tatenhove, J.P.M., Tysiachniouk, M. (2018) Oil and indigenous people in sub-Arctic Russia: rethinking equity and governance in benefit sharing agreements, *Energy Res. Soc. Sci*, no. 5 (4), pp. 140-152 .

Maksimova, O.V., Aronov, I.Z. (2021) Study of Factors Influence on the Variability of Time for Consensus Building in Coalitions Based on Regular Markov Chains, *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, vol. 6, no. 4, pp. 1076-1088, doi:10.33889/IJMEMS.2021.6.4.063.

Open science collaboration. Estimating the reproducibility of psychological science. (2015) *Science*, vol. 349, no. 6251.

Zazhigalkin, A.V., Aronov, I.Z., Maksimova, O.V., Papic, L. (2019) Control of consensus convergence in technical committees of standardization on the basis of regular Markov chains model, *Springer India: International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, no. 1, pp. 1-8. doi:10.1007/s13198-019-00765-1.

Статья поступила в редакцию (Received): 06.02.2023 г.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 29.03.2023 г.

Для цитирования / For citation

Максимова, О.В., Аронов, И.З., Еремеева, Н.В. (2023) Анализ практики достижения этнокохозяйственного консенсуса на основе моделирования переговорного процесса, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 1-2, с. 92-109, doi:10.21513/0207-2564-2023-1-2-92-109.

Maksimova, O.V., Aronov, I.Z., Eremeeva, N.V. (2023) Analysis of the practice of achieving an ethno-economic consensus based on the modeling of the negotiation process, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXIV, № 1-2, с. 92-109, doi:10.21513/0207-2564-2023-1-2-92-109.

**Фенологический мониторинг фитоценозов основных
высотных поясов в Кавказском заповеднике
с использованием метода В.А. Батманова***Ю.Н. Спасовский*

Кавказский государственный природный биосферный заповедник им. Х.Г. Шапошникова,
Россия, 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Советская, 187

Адрес для переписки: *b.bonatus@mail.ru*

Реферат. Сезонная динамика растительных сообществ – один из важнейших показателей, имеющих аналитическое значение для оценки состава и структуры фитоценозов и популяций животных. Актуальность изучения сезонной динамики в последние годы все более возрастает на фоне наблюдаемых тенденций, связанных с глобальным изменением климата, признаки которого активно дискутируются в последнее время.

Основная цель проведенных исследований – определить тенденции сезонного развития фитоценозов в их взаимодействии с абиотическими факторами среды в основных высотных поясах северного макросклона Кавказского заповедника.

Для осуществления поставленной цели было предложено использовать метод комплексных фенологических показателей В.А. Батманова для фенологического мониторинга растительности в лесных и луговых фитоценозах.

В статье кратко описана методика исследований, показаны результаты мониторинга фитоценозов основных высотных поясов на фенологическом профиле «Кордон Гузерипль – гора Тыбга». Дан анализ полученных результатов наблюдений в сезоне 2022 г. и отмечены основные достоинства выбранного метода для фенологических исследований в условиях Кавказского заповедника.

Ключевые слова. Фенологический профиль, фенологическая фаза, суммированная фенологическая характеристика, средний фенологический коэффициент, феноаномалия.

**Phenological and monitoring of plant communities of the main
high-altitude zones in the Caucasian Reserve method of V.A. Batmanov***Yu.N. Spasovsky*

Caucasus State Natural Biosphere Reserve named after H.G. Shaposhnikov,
187, Sovetskaya str., 385000, Maykop, Republic of Adygea, Russian Federation

Correspondence address: *b.bonatus@mail.ru*

Abstract. Seasonal dynamics of plant communities is one of the most important indicators of analytical importance for assessing the composition and structure of plant communities and animal populations. The relevance of studying seasonal dynamics has been increasing in recent years in terms of observed trends related to global climate change, the signs of which have been actively debated recently.

The article presents the results of research, the main purpose of which is to determine the trends of seasonal development of plant communities in their interaction with abiotic environmental factors in the main altitude zones of the northern mountain macro slope of the Caucasian Reserve.

To achieve this goal, it was proposed to use the method of complex phenological indicators of V.A. Batmanov for phenological monitoring of vegetation in forest and meadow plant communities.

This publication briefly describes the methodology and shows the results of phenological monitoring of plant communities of the main high-altitude zones, on the phenological profile «the Village Guzeripl – the Mount Tybga». The assessment of the obtained results of observations in the 2022 season is given and the main advantages of the chosen method for phenological studies in the conditions of the Caucasian Reserve are noted.

Keywords. Phenological profile, phenological phase, summarized phenological characteristic, mean phenological coefficient, phenoanomaly.

Введение

В Кавказском заповеднике фенологическим наблюдениям и исследованиям всегда уделялось значительное внимание. С момента организации заповедника, с 1924 года и по настоящее время применяется система разовых (моментных) наблюдений как за растениями, так и за животными, которая фиксируется в специальной картотеке. За все годы существования заповедника накоплен значительный фактический материал, включающий в себя более 200 тыс. зафиксированных моментов сезонного развития основных видов млекопитающих и цветковых растений. В 1940-1950-х гг. применялись маршрутные методы изучения сезонной динамики растительных сообществ в зависимости от их высотного расположения, а также отдельных растительных ассоциаций. В 1950-1970-х гг. широкое развитие получили стационарные методы фенологических наблюдений за отдельными видами растений на специальных фенологических площадках. В зоологическом направлении при исследовании экологии крупных млекопитающих заповедника также осуществлялось изучение сезонных ритмов и циклов этих видов животного мира. Таким образом, на протяжении более чем 90-летней истории, в заповеднике в той или иной степени внедрялись и апробировались различные методы фенологических исследований в зависимости от поставленных целей.

Основная цель настоящих исследований – определить тенденции сезонного развития фитоценозов в их взаимодействии с абиотическими факторами среды в основных высотных поясах северного макросклона Кавказского заповедника.

Материалы и методы

В 2001 г. в перспективный План НИР заповедника был введен раздел «Фенологический мониторинг фитоценозов основных высотных поясов». При разработке системы и методов наблюдений были использованы рекомендации Г.П. Вязовской (1947), И.Н. Бейдеман (1974), Г.Э. Шульца (1981), Г.Н. Зайцева (1981).

В 2006 г. в рамках этого раздела для дальнейших исследований автор предложил применить метод комплексных фенологических показателей разработанный В.А. Батмановым (1952, 1967а, 1967б, 1972), дополненный и унифицированный М.К. Куприяновой (1982, 1995) и Е.Ю. Терентьевой (2001). Предлагалось, изучив основные положения метода, отработать его на уже заложенном фенологическом профиле, в условиях северного макросклона заповедника, и применять в дальнейшем в качестве ведущего метода фенологического мониторинга над характерными растительными сообществами.

В основе метода В.А. Батманова лежит положение о том, что вегетационный период растений включает два основных процесса (цикла): *генеративный*, связанный с развитием генеративных органов и производством потомства, и *вегетативный* в течение которого происходят сезонные изменения ассимиляционного аппарата растения первой весенней генерации. Для оценки каждого сезонного процесса применяется т.н. «*фенологический стандарт*», который представляет собой ряд последовательно сменяющих друг друга фенологических фаз, составленных отдельно для каждого сезонного цикла. Каждой фенофазе присвоен цифровой балл и буквенное обозначение. Для вегетативного цикла феностандарт состоит из восьми фенофаз, для генеративного – из девяти (Терентьева, 2001). Безусловно, такой фенологический стандарт не отражает сезонное развитие всех систематических групп растений, но в нашем случае все наблюдаемые виды вполне вписались в выбранные параметры стандарта.

Наблюдения осуществлялись на фенологическом профиле: «Кордон Гузерибль – гора Тыбга», который был заложен в 2001 г. и проходит по основным высотным поясам Пшекиш-Бамбакского геоботанического района Кавказского заповедника (Голгофская, 1967). Вдоль профиля было заложено шесть учетных фенологических площадок (ФП), которые были пронумерованы по порядку (ФП – 1, 2, 3...) в соответствии с их удалением от начальной точки и высотным расположением. Была описана их орография, почвенные условия и определен тип фитоценоза (Алтухов, 1985; Горчарук, 1992; Чумаченко, 2003; Спасовский, 2008).

Закладка фенологических площадок осуществлялась по общей методике закладки фенологических площадей (Бейдеман, 1974) и методу долговременных пробных площадей при изучении биоразнообразия лесных экосистем (Dallmeier, 1992). На местности площадки были промаркированы и зафиксированы с помощью системы GPS (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика фенологического профиля «Кордон Гузерипль – гора Тыбга»

Table 1. Description of the phenological profile « the Village Guzeripl – the Mount Tybga »

Площадка, фитоценоз	Орография, местоположение, высота над у. м.	Склон	Древостой	Кустарники	Травяной ярус
ФП-1 – Букняк среднетравно-ожиново-папоротниковый	Окрестности кордона Гузерипль, 684 м над у. м., 44°59'с.ш. 40°08'в.д.	Ю-3, 2 ⁰	6Бк2Бк2ПК.	<i>Rhododendron ponticum</i> L.	<i>Impatiens noli-tangere</i> L., <i>Paris incompleta</i> Bieb., <i>Geranium robertianum</i> L. и др.
ФП-2 – Буко-пихтарник среднетравно-ожиново-папоротниковый	4-й км тропы, Пастбище Абаго, 1017 м над у.м. 44°58'с.ш. 40°09'в.д.	Ю-3, 2 ⁰	3ПК3ПК2Бк2Бк+ПК	<i>Rhododendron ponticum</i> L, <i>Sambucus nigra</i> L.	<i>Impatiens noli-tangere</i> , <i>Geranium robertianum</i> , <i>Paris incompleta</i> , <i>Festuca drymeja</i> Mert. et Koch и др.
ФП-3 – Буко-пихтарник среднетравно-овсяницевый	6-й км тропы, Пастбище Абаго, 1383 м над у.м. 43°58'с.ш. 40°10'в.д.	Ю-В, 30 ⁰	I ярус – 10ПК; II ярус – 7ПК3Бк+Кл подрост – 8ПК2Бк+Кл	<i>Rubus caesius</i> L.	<i>Festuca drymeja</i> , <i>Geranium robertianum</i> , <i>Helleborus caucasicus</i> A.Br., <i>Polygonatum multiflorum</i> (L.) All. и др.
ФП-4 – Букняк саблевидный среднетравно-злаковый	11-й км тропы, Пастбище Абаго, 1783 м над у.м. 43°56'с.ш. 40°12'в.д.	С, 10 ⁰	7Бк1Б1Клв1П К+Р подрост – 8Бк1ПК1Клв	<i>Daphne alboboviana</i> Woronow ex Pobed., <i>Ribes biebersteinii</i> Berl. ex DC	<i>Festuca drymeja</i> , <i>Milium schmidtianum</i> C. Koch, <i>Aconitum orientale</i> Mill., <i>Senecio propinquus</i> Schischk., <i>Euphorbia macroceras</i> Fisch. et C.A. Mey. и др..
ФП-5 – Разнотравно-пестро-овсяницевый луг	21-й км тропы, отрог горы Тыбга, 2050 м над у. м. 43°53'71''с.ш 40°16'50''в.д	Седловина отрога	–	<i>Rhododendron caucasicum</i> Pall.	<i>Festuca versicolor</i> Tausch., <i>Bistorta carnea</i> (C.Koch) Kom., <i>Iris sibirica</i> L., <i>Epilobium montanum</i> L. и др.
ФП-6 – Разнотравно-приземисто-овсяницевый луг	22-й км тропы, отрог горы Тыбга, 2350 м над у.м. 43°53'09''с.ш. 40°16'36''в.д.	Пологий участок на гребне	–	<i>Rhododendron caucasicum</i> Pall	<i>Festuca airoides</i> Lam., <i>Ranunculus oreophilus</i> Bieb., <i>Carex tristis</i> Bieb., <i>Anemonastrum speciosum</i> (Adams ex G.Pritz.), <i>Primula amoena</i> Bieb. и др.

Примечание. Формулы древостоя в таблице даны в соответствии с Таксационным описанием КГПБЗ, «Воронежлеспроект», 2005 г. Основные сокращения: Бк – бук восточный; ПК – пихта кавказская; Кл – клен явор; Клв – клен высокогорный; Р – рябина.

Наблюдения проводились т.н. «*первичным описательным методом*» (Батманов, 1967а, 1972; Куприянова, 1995, 2000) суть которого в том, что при прохождении маршрута регистрировалось фенологическое состояние (фенофаза) каждого вида растения (учетной единицы) на учетной площадке в момент посещения (в определенную дату). Основное преимущество данного метода перед обычным методом «*регистратора срока*» (Батманов, 1967а, 1972) в том, что каждое прохождение маршрута и осмотр фитоценозов давало некий законченный результат наблюдений, который фиксировался на специальном бланке.

По рекомендациям Е.Ю. Терентьевой (2001), посещения площадок должны проводиться через 7-10 дней, однако в нашем случае они проводились в среднем один раз в 15-20 дней. Выбор такой частоты наблюдений был продиктован в первую очередь удаленностью начальной точки профиля (почти 100 км) от места нахождения исполнителя. Во-вторых, протяженностью и сложностью рельефа самого профиля, длина которого составляет 22 км, а превышение по вертикали – почти 2 км. В среднем прохождение профиля с выполнением описаний наблюдений занимает от двух до трех дней. Все это несколько снижает достоверность отдельных получаемых результатов, но мы исходили из того, что в случае использования метода В.А. Батманова мы имеем однонаправленный тренд развития фитоценозов, и наблюдения рассчитаны на долгосрочный период, что в конечном итоге сглаживает возможные отклонения при статистической обработке.

Процесс наступления той или иной фенологической фазы у разных видов подчинен закону нормального распределения (Лакин, 1968; Харин и др., 1993), поэтому за феномежу мы принимали либо 25% от общего количества растений одного вида, вступивших в фенофазу, либо 25% проективного покрытия вида. Это позволяло в определенной мере избежать влияния индивидуальной изменчивости на результаты наблюдения.

Результатом каждого посещения феноплощадки был информационный бланк о фенологическом состоянии видов фитоценоза, в котором общее количество отметок (+) основных фенофаз равно количеству видов фитоценоза (Спасовский, 2013). Полученная сумма таких отметок по каждой фенофазе (столбику бланка) переводилась в проценты от общего количества наблюдаемых видов данного фитоценоза. Это процентное соотношение видов растений, находящихся в определенной фенофазе на день обследования, и есть по В.А. Батманову – «*суммированная фенологическая характеристика*» (СФХ) данного фитоценоза, которая характеризует фенологическое состояние фитоценоза в день наблюдений.

Согласно В.А. Батманову, суммированные фенологические характеристики вполне отражают характер сезонного развития растительности изучаемых фитоценозов. Впоследствии Е.Ю. Терентьева (1996, 1997, 2000) предложила целесообразным для каждой СФХ вычислять т.н. «*средний фенологический коэффициент*» (Kf), который представляет собой средний взвешенный балл фенологического состояния фитоценоза равный сумме баллов фенофаз каждого вида отнесенной к числу вегетирующих видов фитоценоза.

Сопоставление среднего взвешенного балла с рядом фенофаз стандарта позволяет судить о состоянии сезонного развития фитоценоза в целом по изучаемому процессу на день исследования.

В итоге, используя полученные значения фенологических коэффициентов за 15 лет наблюдений, мы рассчитали среднепериодные значения коэффициентов (K_{fcp}) для каждого фитоценоза, получив таким образом определенную среднемноголетнюю норму сезонной динамики для шести фитоценозов основных высотных поясов Кавказского заповедника. На основе K_{fcp} были рассчитаны значения феноаномалий по результатам наблюдений в сезоне 2022 года. Анализ феноаномалий проведен для трех фитоценозов (ФП-1, ФП-4 и ФП-6), отражающих основные высотные пояса. С помощью стандартной программы Microsoft Excel рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона между минимальными (аналогично максимальными) значениями температуры воздуха и сезонными феноявлениями фитоценозов основных высотных поясов северного макросклона Кавказского заповедника.

Результаты

Показатели K_{fcp} позволяют оценивать погодичную феноизменчивость наблюдаемых фитоценозов посредством вычисления их *феноаномалий* (F) – разницы между K_{fcp} и показателями K_f в отдельные годы наблюдений. Положительные значения F показывают депрессивный характер сезонной динамики фитоценозов или их запаздывание по отношению к нормам. Отрицательные значения F – наоборот, характеризуют экспрессивное развитие сезонных процессов, т.е. их опережение по сравнению с нормой.

В качестве примера такого анализа мы показываем выявленную динамику феноаномалий по результатам наблюдений в сезоне 2022 года. Значения фенологических коэффициентов и феноаномалий для всех фитоценозов представлены в табл. 2.

Для анализа феноаномалий вегетативного цикла мы сравнили их значения для трех фитоценозов, находящихся в пределах лесного пояса (ФП-1), верхней границы леса (ФП-4) и альпийского луга (ФП-6). Выбор этих фитоценозов продиктован тем, что они качественно отличаются друг от друга и, кроме того, отражают основные высотные пояса. Таким образом, мы сравниваем тенденции сезонного развития фитоценозов в ландшафтном приближении.

Анализ значений средних фенологических коэффициентов и феноаномалий (см. табл. 2) показывает, что весенняя динамика вегетативного цикла 2022 г. на этапе набухания листовых почек ($K_{fv} = 1.0$) в лесном поясе (ФП-1) носила явный депрессивный характер, что наглядно демонстрирует характер кривых феноаномалий (рис. 1).

Таблица 2. Сезонная динамика и феноаномалии $F(\theta)$ и $F(z)$ фенопрофиля «Кордон Гузерипль – гора Тыбга» в 2022 году

Table 2. Seasonal dynamics and phenological anomalies $F(\theta)$ и $F(z)$ of the phenological profile «the Village Guzeripl – the Mount Tybga»

	Даты наблюдений													
	26.2	9.3	22.3	17.4	30.4	19.5	7.6	22.6	7.7	29.7	21.8	27.9	15.10	
Вегетативный цикл														
ФП-1														
$Kf(\theta)$ 2022	0.0	0.0	0.0	2.3	2.6	3.5	4.3	4.6	4.9	5.2	5.4	5.6	5.8	
$Kf(\theta)$ ср.	0.0	1.6	2.1	2.6	2.9	3.5	4.0	4.6	5.0	5.3	5.5	5.9	6.3	
$F(\theta)$ 2022	0.0	1.6	2.1	0.3	0.3	0.0	-0.3	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	
ФП-2														
$Kf(\theta)$ 2022	0.0	0.0	0.0	1.7	2.4	3.6	4.2	4.4	4.7	5.1	5.4	5.7	6.0	
$Kf(\theta)$ ср.	0.0	1.1	1.7	2.4	2.9	3.5	4.0	4.5	4.9	5.2	5.5	5.9	6.3	
$F(\theta)$ 2022	0.0	1.1	1.7	0.7	0.5	-0.1	-0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	
ФП-3														
$Kf(\theta)$ 2022	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	2.9	4.0	4.1	4.5	4.9	5.2	5.7	6.2	
$Kf(\theta)$ ср.	0.0	1.0	1.2	1.8	2.4	3.1	3.7	4.3	4.7	5.0	5.4	6.0	6.5	
$F(\theta)$ 2022	0.0	1.0	1.2	0.8	0.4	0.2	-0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	
ФП-4														
$Kf(\theta)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.3	3.5	4.3	4.7	5.0	6.1	7.2	
$Kf(\theta)$ ср.	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.9	3.0	3.8	4.4	5.0	5.5	6.5	7.3	
$F(\theta)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.9	-0.3	0.3	0.1	0.3	0.5	0.4	0.1	
ФП-5														
$Kf(\theta)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	2.9	3.9	4.5	5.1	6.3	7.5	
$Kf(\theta)$ ср.	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.6	2.6	3.4	4.0	4.8	5.5	6.8	7.5	
$F(\theta)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.6	-0.4	0.5	0.1	0.3	0.4	0.5	0.0	
ФП-6														
$Kf(\theta)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.3	3.1	4.2	5.2	7.3	8.0	
$Kf(\theta)$ ср.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.9	3.1	4.0	4.9	5.8	7.0	7.7	
$F(\theta)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.7	0.8	0.9	0.7	0.6	-0.3	-0.3	
Генеративный цикл														
ФП-1														
$Kf(z)$ 2022	0.0	0.0	0.0	2.4	3.8	4.2	5.0	5.5	5.9	6.7	7.4	8.1	8.8	
$Kf(z)$ ср.	0.0	1.0	1.2	2.3	3.2	4.1	4.9	5.7	6.3	6.9	7.3	8.1	8.5	
$F(z)$ 2022	0.0	1.0	1.2	-0.1	-0.6	-0.1	-0.1	0.2	0.4	0.2	-0.1	0.0	-0.3	

Продолжение таблицы 2

	Даты наблюдений													
	26.2	9.3	22.3	17.4	30.4	19.5	7.6	22.6	7.7	29.7	21.8	27.9	15.10	
ФП-2														
$Kf(z)$ 2022	0.0	0.0	0.0	2.0	3.0	4.1	5.0	5.6	6.1	6.7	7.8	8.5	9.0	
$Kf(z)$ ср.	0.0	1.0	1.2	2.2	3.1	4.0	4.8	5.7	6.5	7.3	7.8	8.4	8.7	
$F(z)$ 2022	0.0	1.0	1.2	0.2	0.1	-0.1	-0.2	0.1	0.4	0.6	0.0	-0.1	-0.3	
ФП-3														
$Kf(z)$ 2022	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	3.3	4.8	5.0	5.6	6.7	7.8	8.6	9.0	
$Kf(z)$ ср.	0.0	0.0	1.0	1.7	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.2	7.8	8.4	8.8	
$F(z)$ 2022	0.0	0.0	1.0	0.7	0.6	0.3	-0.2	0.5	0.7	0.5	0.0	-0.2	-0.2	
ФП-4														
$Kf(z)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.2	3.2	3.8	4.6	5.8	6.9	8.7	9.0	
$Kf(z)$ ср.	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	3.4	4.4	5.2	6.2	7.3	8.4	8.9	
$F(z)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.2	0.6	0.6	0.4	0.4	-0.3	-0.1	
ФП-5														
$Kf(z)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	3.5	3.9	5.0	6.0	8.1	9.0	
$Kf(z)$ ср.	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.5	2.4	3.5	4.1	5.3	6.5	8.0	8.7	
$F(z)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.5	-0.7	0.0	0.2	0.3	0.5	-0.1	-0.3	
ФП-6														
$Kf(z)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.9	3.8	5.0	6.3	8.8	9.0	
$Kf(z)$ ср.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.5	2.8	3.6	5.3	6.9	8.5	9.0	
$F(z)$ 2022	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-0.5	-0.1	-0.2	0.3	0.6	-0.3	0.0	

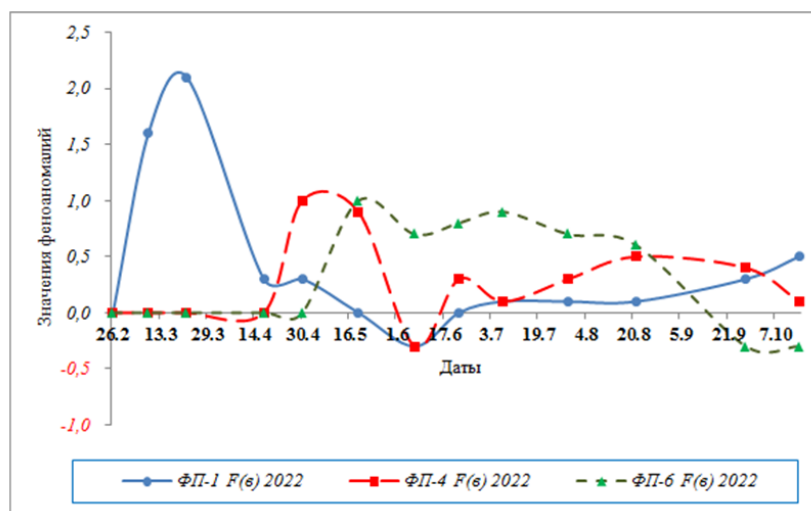


Рисунок 1. Динамика феноаномалий вегетативного цикла лесного пояса (ФП-1), верхней границы леса (ФП-4) и альпийского луга (ФП-6) в сезоне 2022 года

Figure 1. Dynamics of phenological anomalies of the vegetative cycle of the forest belt (ФП-1) of the upper border of the forest (ФП-4) and the alpine meadow (ФП-6) in the 2022 season

Начало вегетации было зафиксировано в начале первой декады апреля со значительной положительной феноаномалией, значение которой составило $F(\vartheta) = 2.1$ балла. Запаздывание начала вегетации относительно своих многолетних норм в лесном поясе определялось динамикой температур воздуха и состоянием снежного покрова в этот период. Среднемесячная температура марта, по данным метеостанции «Гузерибль», составила всего $+0.6^{\circ}\text{C}$, что на 2 градуса меньше многолетней нормы. Причем практически на протяжении всего месяца минимальные температуры воздуха не поднимались выше 0°C , а в отдельные дни даже опускались ниже -5.0°C . При этом неоднократно в течение месяца выпадал снег, средняя высота снежного покрова временами достигала 5 см. Все эти факторы и обеспечили довольно значительное запаздывание вегетации в лесном поясе.

Дальнейшее развитие весенних феноявлений протекало практически в пределах своих многолетних сроков и даже с незначительной экспрессией, которая была зафиксирована на стадии молодого листа ($Kfv = 4.0$) в первой декаде июня (см. табл. 2).

Вычисление корреляционной зависимости между температурами воздуха, по данным метеостанции «Гузерибль», и весенними феноявлениями фитоценозов всех площадок лесного пояса, показало высокую прямую зависимость: в среднем для минимальных температур коэффициент корреляции составил $r = 0.90$, а для максимальных $r = 0.82$.

В поясе верхней границы леса (ФП-4) начало вегетации было зафиксировано тоже с отставанием относительно своей многолетней нормы – в конце второй декады мая, значение феноаномалии составило $F(\vartheta) = 1.0$ балл. Объясняется это также динамикой температурных условий и состоянием снежного покрова. По данным метеостанции «Джуга», во всех трех декадах апреля минимальные температуры воздуха в субальпийском поясе, а равно и в поясе верхней границы леса, неоднократно были ниже 0°C . Средняя максимальная температура воздуха апреля составила $+8.0^{\circ}\text{C}$. Кроме этого всю первую половину апреля в субальпике держался устойчивый снежный покров. Отрицательные температуры воздуха сохранялись и в первой половине мая. Все это в итоге и определило отставание начала вегетации.

Дальнейшее весеннее развитие растений верхней границы леса в целом выравнивалось и протекало почти в пределах своих многолетних норм и даже с незначительной экспрессией на стадии роста листа ($Kfv = 3.0$), в первой декаде июня.

Вычисление корреляционной зависимости между температурами воздуха и весенними феноявлениями показало их высокую прямую зависимость: для минимальных температур коэффициент корреляции составил $r = 0.87$, а для максимальных $r = 0.67$.

Начало вегетации в альпийском фитоценозе (ФП-6) было зафиксировано тоже с отставанием относительно многолетних сроков – в первой декаде июня, со значением феноаномалии $F(\vartheta) = 1.0$ балл. По данным гигрохрона, установленного на площадке, средняя температура воздуха к концу третьей декады мая в альпийском поясе составила всего $+6.4^{\circ}\text{C}$. Температура воздуха

в этот период, как уже указывалось, неоднократно опускалась ниже 0°C с минимальным значением -4.6°C, правда продолжительность заморозков не превысила пяти дней.

В последующем весеннее развитие альпийского фитоценоза протекало с отставанием относительно своих многолетних сроков. Максимальное положительное значение феноаномалии $F(\phi) = 0.9$ балла было отмечено на стадии роста листа, в первой декаде июля.

Вычисление корреляционной зависимости между температурами воздуха и весенними феноявлениями в альпийском поясе показало их тесную прямую зависимость: для минимальных температур коэффициент корреляции составил $r = 0.79$, а для максимальных $r = 0.75$.

Начало летней вегетации ($Kf\psi = 5.0$) в лесном поясе было зафиксировано в начале второй декады июля с незначительным отставанием относительно многолетних сроков, в среднем $F(\phi) = 0.1$ балла. В поясе верхней границы леса и альпийском поясе начало летнего периода наступило практически на месяц позднее – во второй декаде августа, $F(\phi) = 0.5$ балла.

Дальнейшее развитие летне-осенней вегетации во всех фитоценозах протекало с незначительным отставанием относительно своих многолетних сроков, в среднем со значением феноаномалии $F(\phi) = 0.3$ балла. Правда в альпийском поясе, в период массового отмирания ($Kf\psi = 7.0$), в конце третьей декады сентября была отмечена незначительная экспрессия со значением феноаномалии $F(\phi) = -0.3$ балла.

Вычисление корреляционной зависимости между температурами и летне-осенними феноявлениями показало тесную обратную зависимость практически во всех фитоценозах. В среднем коэффициент корреляции для минимальных температур воздуха составил $r = -0.86$, а для максимальных температур $r = -0.89$. При этом, по данным метеонаблюдений, конец лета и начало осени как в лесном поясе, так и в высокогорье были относительно мягкими в плане температурного режима. В течение всего сентября, по данным гигрохронов, минимальные суточные температуры воздуха в лесном поясе не опускались ниже +4.6°C, а средняя максимальная температура воздуха составила +19.4°C. В альпийском поясе лишь в конце первой декады сентября было зафиксировано незначительное понижение температуры до -0.4°C, средняя максимальная температура составила +14.3°C.

В динамике весенних феноявлений генеративного цикла 2022 г. сложилась похожая картина. Судя по значениям феноаномалии, период бутонизации ($Kf\eta = 1.0$) в лесном поясе начался в конце третьей декады марта с явной депрессией – $F(\zeta) = 1.2$ балла (рис. 2). Но период цветения ($Kf\zeta = 3.0$) протекал уже с явной экспрессией: начало цветения было зафиксировано в конце второй декады апреля, значение феноаномалии составило $F(\zeta) = -0.6$ балла.

Вычисление корреляционной зависимости между температурами воздуха и весенними феноявлениями генеративного цикла в лесном поясе показало также их высокую прямую зависимость, для минимальных температур коэффициент корреляции составил $r = 0.80$, а для максимальных $r = 0.77$.

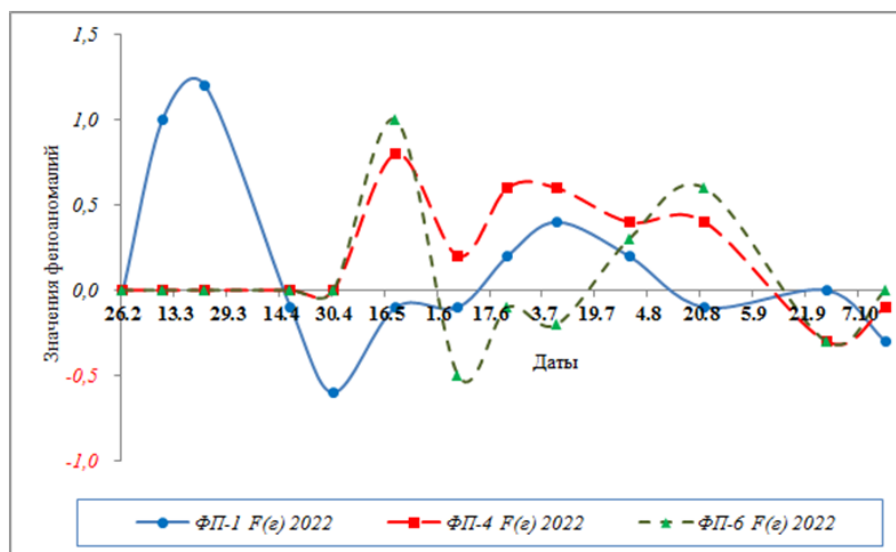


Рисунок 2. Динамика феноаномалий генеративного цикла лесного пояса (ФП-1), верхней границы леса (ФП-4) и альпийского луга (ФП-6) в сезоне 2022 года

Figure 2. Dynamics of phenological anomalies of the generative cycle of the forest belt (ФП-1) of the upper border of the forest (ФП-4) and the alpine meadow (ФП-6) in the 2022 season

В поясе верхней границы леса период бутонизации начался практически в пределах своей многолетней нормы – в конце третьей декады апреля. Однако начало цветения было зафиксировано с явным опозданием – в конце первой декады июня, значение феноаномалии составило $F(z) = 0.6$ балла.

Вычисление корреляционной зависимости между температурами воздуха и весенними феноявлениями генеративного цикла верхней границы леса показало высокую прямую зависимость для минимальных температур, здесь коэффициент корреляции составил $r = 0.90$, а для максимальных температур он оказался несколько ниже $r = 0.69$.

В альпийском поясе весеннее генеративное развитие началось с явным отставанием относительно своих многолетних сроков – в начале первой декады июня, $F(z) = 1.0$ балл. Но уже к началу цветения, которое было зафиксировано в начале третьей декады июня, была отмечена незначительная экспрессия со значением феноаномалии $F(z) = -0.2$ балла.

Вычисление корреляционной зависимости между температурами воздуха и весенними феноявлениями в генеративном цикле альпийского пояса показало их тесную прямую зависимость, так для минимальных температур коэффициент корреляции составил $r = 0.81$, а для максимальных $r = 0.76$.

Летне-осенняя динамика генеративного цикла была несколько различна в наблюдаемых фитоценозах. В лесном поясе период окончания цветения ($Kfz = 5.0$) наступил уже в первой декаде июня, практически в пределах своей многолетней нормы, $F(z) = -0.1$ балла. В поясе верхней границы леса период цветения закончился на месяц позднее – во второй декаде июля с

незначительным опозданием $F(\varepsilon) = 0.6$ балла. В альпийском поясе окончание цветения наступило в конце третьей декады июля, почти в пределах своих многолетних сроков – $F(\varepsilon) = 0.3$ балла.

Период созревания плодов ($Kf\varepsilon = 7.0$) в лесном поясе начался в начале второй декады августа с незначительной экспрессией, в пределах своей многолетней нормы $F(\varepsilon) = -0.1$ балла. В поясе верхней границы леса и в альпийском поясе период плодоношения начался практически одинаково – в третьей декаде августа, с незначительным отставанием относительно многолетних сроков, среднее значение феноаномалии составило $F(\varepsilon) = 0.5$ балла.

Окончание плодоношения – опадание плодов ($Kf\varepsilon = 8.0$) в лесном поясе было зафиксировано в третьей декаде сентября, т.е. в свои многолетние сроки. В верхней границе леса и в альпийском поясе этот период наступил на несколько дней раньше – в начале второй декады сентября, с незначительной экспрессией – $F(\varepsilon) = -0.3$ балла, что наглядно видно по характеру кривых рис. 2.

Выявление корреляционной зависимости между летне-осенними феноявлениями и температурами воздуха для всех фитоценозов показало вполне значимую обратную зависимость. Для минимальных температур в среднем коэффициент корреляции составил $r = -0.67$, а для максимальных $r = -0.68$.

Заключение

Анализ сезонной динамики 2022 г. показал, что наибольшие отклонения от своих многолетних норм, как в вегетативном, так и в генеративном циклах, наблюдались в весенний период. Объясняется это в большей мере так называемыми «температурными качелями», особенно характерными в горных условиях в первые весенние месяцы.

В начале вегетации практически во всех фитоценозах наблюдались только положительные феноаномалии, т.е. фенологические явления наступали позднее своей многолетней нормы. Наибольшее значение положительной феноаномалии было отмечено для весеннего периода вегетативного цикла в лесном поясе, здесь значение феноаномалии достигало $F(\varepsilon) = 2.1$ балла.

Развитие летне-осенних явлений вегетативного цикла во всех фитоценозах протекало примерно одинаково с незначительным отставанием относительно своих многолетних сроков, в среднем со значением феноаномалии $F(\varepsilon) = 0.3$ балла. А завершение летней вегетации протекало с небольшим опережением своей многолетней нормы, максимальное значение феноаномалии наблюдалось в альпийском поясе $F(\varepsilon) = -0.3$ балла.

Весенний период в генеративном цикле был аналогичен вегетативному циклу. В лесном поясе на начальном этапе также наблюдалось депрессивное развитие со значением феноаномалии $F(\varepsilon) = 1.2$ балла. Развитие растений верхней границы леса началось практически в свои многолетние сроки, а в альпийском поясе наблюдалось значительное отставание, $F(\varepsilon) = 1.0$ балл.

Динамика летне-осенних явлений генеративного цикла в разных высотных поясах была неодинакова. Окончание цветения в лесном поясе и в альпийском наступило практически в пределах своей многолетней нормы. В верхней гра-

нице леса оно протекало с явной депрессией, здесь значение феноаномалии составило $F(z) = 0.6$ балла. Созревание плодов и окончание плодоношения в лесном поясе протекало в пределах своих многолетних сроков. А в верхней границе леса и в альпийском поясе оно незначительно отставало в среднем на $F(z) = 0.4$ балла. При этом окончание плодоношения в альпийском поясе протекало даже с незначительной экспрессией, $F(z) = -0.3$ балла.

Выявление корреляционной зависимости между сезонными явлениями и суточными температурами воздуха показало их наиболее тесную прямую зависимость в весенний период. Во всех высотных поясах среднее значение коэффициента корреляции вегетативного цикла для минимальных температур составило $r = 0.85$, а для максимальных $r = 0.77$. В генеративном цикле средние значения коэффициентов были соответственно $r = 0.84$ и $r = 0.74$.

Подводя итог, можно с определенной уверенностью сказать, что метод комплексных фенологических показателей В.А. Батманова наиболее приемлем для ведения фенологического мониторинга в условиях Кавказского заповедника. Метод отличается относительная простота сбора и обработки информации, которая позволяет использовать данные как однократных, так и постоянных наблюдений. Метод позволяет сравнивать полученные результаты наблюдений даже в случае сильно отличающихся по видовому составу фитоценозов, поскольку мы оцениваем комплексные фенологические характеристики, а не фенологическое состояние каждого вида в отдельности.

Показатель среднего фенологического коэффициента учитывает фенологическое состояние всех видов растений данного фитоценоза, и, будучи выраженным по каждому процессу всего одним числом, соответственно поддается математической обработке (Спасовский, 2013). Однонаправленность показателей дает возможность отслеживать тенденции фенологических изменений растительного сообщества во времени и пространстве (определять фенологическую изменчивость сезонных процессов) и при многолетних наблюдениях проводить статистический анализ, что, несомненно, является более конкретным отражением результатов фенологического мониторинга в целом. Возможен также анализ собранных данных внутри какой-либо феноплощадки, через дифференцирование видов на качественно отличные группы в зависимости от целей исследования (по жизненным формам, по феноритмотипам, по ярусности и т.п.).

Список литературы

Алтухов, М.Д. (1985) *Растительный покров высокогорий Северо-Западного Кавказа, его рациональное использование и охрана*, дис. ... д.б.н., Майкоп, Адыг. гос. пед. институт, 400 с.

Батманов, В.А. (1952) *Календарь природы Свердловска и его окрестностей*, Свердловск, Свердл. обл. гос. изд., 98 с.

Батманов, В.А. (1967а) К методике осенних фенологических наблюдений за окрашиванием листы и листопадом, *Ритмы природы Сибири и Дальнего*

Востока, ч. 1, Иркутск, Сибирское книжное изд., с. 122-128.

Батманов, В.А. (1967) Заметки по теории фенологических наблюдений, *Ритмы природы Сибири и Дальнего Востока*, ч. 1, Иркутск, Сибирское книжное изд., с. 7-30.

Батманов, В.А. (1972) Об использовании вариационной статистики в фенологических исследованиях, *Вопросы фенологического картирования*, Л., Гидромет. изд., с. 90-96.

Бейдеман, И.Н. (1974) *Методика изучения фенологии растений и растительных сообществ*, Новосибирск, Наука, 154 с.

Вязовская, Г.П. (1947) Вертикальная изменчивость растительного и флористического состава Кавказского заповедника, *Отчет о НИР (заключ.)*, Кавказский гос. заповедник, Инв. № 154, Майкоп, 50 с.

Голгофская, К.Ю. (1967) К дробному геоботаническому районированию Кавказского заповедника, *Труды Кавказского государственного заповедника*, вып. 9, М., с. 119-157.

Горчарук, Л.Г. (1992) *Горно-лесные почвы Западного Кавказа*, Депонированная рукопись, ВНИИ ТЭНагропром, М., 234 с.

Зайцев, Г.Н. (1981) *Фенология древесных растений*, М., Наука, 120 с.

Куприянова, М.К., Щенникова, З.К. (1982) Использование описательных методов для изучения сезонной динамики горных природных комплексов, *Сезонная ритмика природы горных областей*, Л., Сев.-Зап. книж. изд., с. 55-57.

Куприянова, М.К. (1995) Научное наследие В.А. Батманова, *Изв. РГО.*, т. 127, вып. 1, с. 14-23.

Куприянова, М.К., Новоженов, Ю.И., Щенникова, З.Г. (2000) *Фенологические наблюдения во внеклассной работе*, Екатеринбург, Банк культурной информации, 244 с.

Лакин, Г.Ф. (1968) *Биометрия*, М., изд. «Высшая школа», 284 с.

Спасовский, Ю.Н. (2008) Фенологический мониторинг основных фитоценозов Кавказского заповедника, *Труды Кавказского государственного природного биосферного заповедника*, вып. 18, Майкоп, ООО «Качество», с. 246-268.

Спасовский, Ю.Н. (2013) Использование метода комплексных фенологических показателей в фенологическом мониторинге Кавказского заповедника, *Труды Кавказского государственного природного биосферного заповедника*, вып. 20, Майкоп, типография «Графика», с. 242-257.

Терентьева, Е.Ю. (1996) Повышение информативности фитофенологических спектров с помощью интегрального описательного метода В.А.Батманова при проведении наблюдений в заповедниках, *Проблемы заповедного дела. 25 лет Висимскому заповеднику, труды научной конференции*, Екатеринбург, изд. «Екатеринбург», с. 103-105.

Терентьева, Е.Ю. (1997) Использование комплексных фенологических характеристик в ландшафтных исследованиях, *Актуальные проблемы эколого-географического изучения Урала для целей оптимизации природопользования и регионализации образования, тезисы докладов научно-практической конференции*, Екатеринбург, изд. Урал гос. пед. ун-та, с. 48-50.

Терентьева, Е.Ю. (2000) Сезонный мониторинг растительности через суммированные фенологические характеристики фитоценозов, *Актуальные проблемы регионального, географического, экологического и биологического образования, труды региональной научно-практической конференции*, Екатеринбург, изд. УрГПУ, с. 116-117.

Терентьева, Е.Ю. (2001) *Комплексные фенологические показатели фитоценозов и их использование при организации феномониторинга*, дис. ... к.б.н., Екатеринбург, Уральский. гос. пед. университет, 177 с.

Харин, Н.Г., Кирильцева, А.А., Грингоф, И.Г. (1993) *Сезонные явления природы: Методы фенологических наблюдений*, С-Пб., Гидрометеоиздат, 136 с.

Чумаченко, Ю.А. (2003) Горно-луговые почвы Кавказского заповедника, *Труды Кавказского государственного природного биосферного заповедника. 80 лет Кавказскому заповеднику – путь от Великокняжеской охоты до Всемирного природного наследия*, Юбилейный, вып. 17, Сочи, Проспект, с. 122-146.

Шульц, Г.Э. (1981) *Общая фенология*, Л., Наука, 188 с

Dallmeier, F. (Ed.) (1992) Long-term monitoring of biological diversity in tropical forest areas: methods for establishment and inventory of permanent plots, *MAB Digest II*, UNESCO, Paris, 72 p.

References

Altuhov, M.D. (1985) *Rastitel'nyj pokrov vysokogorij Severo-Zapadnogo Kavkaza, ego racional'noe ispol'zovanie i ohrana* [Vegetation cover of the highlands of the North-Western Caucasus, its rational use and protection], Doctor's thesis, Majkop, Russia, 400 p.

Batmanov, V.A. (1952) *Kalendar' prirody Sverdlovskaja i ego okrestnostej* [Nature calendar of Sverdlovsk and its environs Sverdlovsk], Sverdlovsk, Russia, 98 p.

Batmanov, V.A. (1967a) К методике осенних фенологических наблюдений за окрашиванием листвы и листопадом [On the methodology of autumn phenological observations of foliage staining and leaf fall], *Ritmy prirody Sibiri i Dal'nego Vostoka*, vol. 1, Irkutsk, Russia, pp. 122-128.

Batmanov, V.A. (1967b) *Zametki po teorii fenologicheskikh nablyudenij* [Notes on the theory of phenological observations], *Ritmy prirody Sibiri i Dal'nego Vostoka*, vol. 1, Irkutsk, Russia, pp. 7-30.

Batmanov, V.A. (1972) *Ob ispol'zovanii variacionnoj statistiki v fenologicheskikh issledovaniyah* [On the use of variation statistics in phenological research], *Voprosy fenologicheskogo kartirovaniya*, Leningrad, Russia, pp. 90-96.

Bejdeman, I.N. (1974) *Metodika izucheniya fenologii rastenij i rastitel'nyh soobshchestv* [Methods of studying the phenology of plants and plant communities], Novosibirsk, Russia, 154 p.

Butorina, T.N., Krutovskaya, E.A. (1958) Korrelyaciya nekotoryh fenoindikatorov s temperaturoj [Correlation of some phenomenon indicators with temperature], *Trudy gosudarstvennogo zapovednika «Stolby»*, vol. 2, Krasnoyarsk, Russia, pp. 10-32.

Vyazovskaya, G.P. (1947) Vertikal'naya izmenchivost' rastitel'nogo i floristicheskogo sostava Kavkazskogo zapovednika [Vertical variability of the plant and floral composition of the Caucasian Reserve], *Otchet o NIR (zaklyuch)*, *Kavkazskij gos. zapovednik*, no. 154, Majkop, Russia, 50 p.

Golgofskaya, K.Yu. (1967) K drobnomu geobotanicheskomu rajonirovaniyu Kavkazskogo zapovednika [Towards fractional geobotanical zoning of the Caucasian Reserve], *Trudy Kavkazskogo gosudarstvennogo zapovednika*, vol. 9, Majkop, Russia, pp. 119-157.

Gorcharuk, L.G. (1992) *Gorno-lesnye pochvy Zapadnogo Kavkaza* [Mountain-forest soils of the Western Caucasus], Deponirovannaya rukopis' [Deposited manuscript], Majkop, Russia, 234 p.

Zajcev, G.N. (1981) *Fenologiya drevesnyh rastenij* [Phenology of woody plants], Majkop, Russia, 120 p.

Kupriyanova, M.K., Shchennikova, Z.K. (1982) Ispol'zovanie opisatel'nyh metodov dlya izucheniya sezonnoj dinamiki gornyh prirodnyh kompleksov [The use of descriptive methods to study the seasonal dynamics of mountain natural complexes], *Sezonnaya ritmika prirody gornyh oblastej*, Leningrad, Russia, pp. 55-57.

Kupriyanova, M.K. (1995) Nauchnoe nasledie V.A. Batmanova [Scientific heritage of V.A. Batmanov], *Izv. RGO*, vol. 127, no. 1, pp. 14-23.

Kupriyanova, M.K., Novozhenov, Yu.I., Shchennikova, Z.G. (2000) *Fenologicheskie nablyudeniya vo vneklassnoj rabote* [Phenological observations in extracurricular activities], Ekaterinburg, Russia, 244 p.

Lakin, G.F. (1968) *Biometriya* [The biometrics], Moscow, Russia, 284 p.

Spasovskij, Yu.N. (2008) Fenologicheskij monitoring osnovnyh fitocenzov Kavkazskogo zapovednika [Phenological monitoring of the main phytocenoses of the Caucasian Reserve], *Trudy Kavkazskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika*, vol. 18, Majkop, Russia, pp. 246-268.

Spasovskij, Yu.N. (2013) Ispol'zovanie metoda kompleksnyh fenologicheskikh pokazatelej v fenologicheskom monitoringe Kavkazskogo zapovednika [Using the method of complex phenological indicators in the phenological monitoring of the Caucasian Reserve], *Trudy Kavkazskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika*, vol. 20, Majkop, Russia, pp. 242-257.

Terent'eva, E.Yu. (1996) Povyshenie informativnosti fitofenologicheskikh spektrov s pomoshch'yu integral'nogo opisatel'nogo metoda V.A.Batmanova pri provedenii nablyudenij v zapovednikah [Increasing the informativeness of phytophenological spectra using the integral descriptive method of V.A.Batmanov when conducting observations in nature reserves], *Problemy zapovednogo dela. 25 let Visimskomu zapovedniku: materialy nauchnoj konferencii*, Ekaterinburg, Russia, pp. 103-105.

Terent'eva, E.Yu. (1997) Ispol'zovanie kompleksnykh fenologicheskikh harakteristik v landshaftnykh issledovaniyakh [The use of complex phenological characteristics in landscape studies], *Aktual'nye problemy ekologo-geograficheskogo izucheniya Urala dlya celej optimizacii prirodnopol'zovaniya i regionalizacii obrazovaniya*, tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferencii, Ekaterinburg, Russia, pp. 48-50.

Terent'eva, E.Yu. (2000) Sezonnij monitoring rastitel'nosti cherez summirovannyye fenologicheskie harakteristiki fitocenofov [Seasonal vegetation monitoring through summarized phenological characteristics of phytocenoses], *Aktual'nye problemy regional'nogo, geograficheskogo, ekologicheskogo i biologicheskogo obrazovaniya*, materialy regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii, Ekaterinburg, Russia, pp. 116-117.

Terent'eva, E.Yu. (2001) *Kompleksnyye fenologicheskie pokazateli fitocenofov i ih ispol'zovanie pri organizacii fenomonitoringa* [Complex phenological indicators of phytocenoses and their use in the organization of phenomonitoring], Candidate's thesis, Ekaterinburg, Russia, 177 p.

Harin, N.G., Kiril'ceva, A.A., Gringof, I.G. (1993) *Sezonnyye yavleniya prirody: Metody fenologicheskikh nablyudenij* [Seasonal natural phenomena: Methods of phenological observations], St.Petersburg, Russia, 136 p.

Chumachenko, Yu.A. (2003) Gorno-lugovyye pochvy Kavkazskogo zapovednika [Mountain-meadow soils of the Caucasian Reserve], *Trudy Kavkazskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika: 80 let Kavkazskomu zapovedniku — put' ot Velikoknyazheskoj ohoty do Vsemirnogo prirodnogo naslediya*, the jubilee vol. 17, Sochi, Russia, pp. 122-146.

Shul'c, G.E. (1981) *Obshchaya fenologiya* [The general phenology], Leningrad, Russia, 188 p.

Dallmeier, F. (Ed.) (1992) Long-term monitoring of biological diversity in tropical forest areas: methods for establishment and inventory of permanent plots, *MAB Digest* 11, UNESCO, Paris, 72 p.

Поступила в редакцию: 11.11.2022.

Доработана после рецензирования: 04.05.2023.

Для цитирования / For citation:

Спасовский, Ю.Н (2023) Фенологический мониторинг фитоценозов основных высотных поясов в Кавказском заповеднике с использованием метода В.А. Батманова, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 1-2, с. 110-127, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-110-127.

Spasovsky, Yu. N. (2023) Phenological and monitoring of plant communities of the main high-altitude zones in the Caucasian Reserve method of V.A. Batmanov, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no. 1-2, pp. 110-127, doi: 10.21513/0207-2564-2022-1-2-110-127.

**Влияние солнечной активности на рост осины
в условиях мордовского заповедника***Д.Е. Румянцев,* Н.С. Воробьева*

Мытищинский филиал Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет),
141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

*Адрес для переписки: *dendro15@list.ru*

Реферат. Начиная с начала XX века, широко обсуждается проблема цикличности во временных рядах радиального прироста древесных растений и ее связь с цикличностью солнечной активности. Часто связь цикличности прироста в связи с цикличностью чисел Вольфа фиксируется для условий лесостепной зоны. В основе данного исследования лежат данные древесно-кольцевых хронологий осины обыкновенной (*Populus tremula* L.), полученные на основе образцов древесины, отобранных в Мордовском государственном природном заповеднике имени П.Г. Смидовича. Всего в анализ было включено 28 индивидуальных хронологий. Измерения ширины годичных колец проведено с помощью прибора Lintab-5. Для проверки правильности измерений использовалась перекрестная датировка в программе Tsar-Win. В нашем исследовании зафиксирована значимая отрицательная связь между изменчивостью индекса прироста осины и изменчивостью чисел Вольфа за период 1938-2017 гг. (коэффициент корреляции равен -0.24). При анализе динамики текущего радиального прироста за пять лет методом расчета скользящего коэффициента корреляции установлены значимые значения коэффициента корреляции от -0.94 до 0.90. Очевидно, что влияние солнечной активности на прирост может модифицироваться иными факторами, предположительно астрофизической природы. Результаты выполненных исследований демонстрируют хорошее соответствие гипотезе М.Г. Романовского и Р.В. Щекалева о том, что влияние солнечной активности на прирост может модифицироваться воздействием галактического излучения. Полученные выводы дают основание для пересмотра и анализа в ином ключе ранее полученных данных о связи между динамикой радиального прироста деревьев и колебаниями величины чисел Вольфа, а также расширяют наши представления о глубине биосферно-космических связей.

Ключевые слова. Влияние астрофизических факторов в биосфере, древесно-кольцевой анализ, *Populus tremula* L., радиальный прирост.

Influence of solar activity on aspen growth in the conditions of the mordovian nature reserve

D.E. Rumyantsev, N.S. Vorobieva*

Mytishchi branch of N.E. Bauman Moscow State Technical University
(National Research University),
1st Institutskaya str., 141005, Moscow region, Mytishchi, Russian Federation

*Correspondence address: *dendro15@list.ru*

Abstract. Since the beginning of the XX century, the problem of cyclicity in the time series of radial growth and woody plants and its relationship with the cyclicity of solar activity has been widely discussed. Often, the relationship of the cyclical growth in connection with the cyclical Wolf numbers is fixed for the conditions of the forest-steppe zone. This study is based on the data of tree-ring chronologies of aspen (*Populus tremula* L.) obtained on the basis of wood samples selected in the Mordovian State Nature Reserve named after P.G. Smidovich. The Lintab 5 device was used to measure the width of the annual ring. To verify the accuracy of the measurements, cross-dating was used in the Tsap-Win program. In our study, a significant negative relationship was recorded between the variability of the aspen growth index and the variability of Wolf numbers for the period 1938-2017 (the correlation coefficient is -0.24). When analyzing the dynamics of the current radial growth over five years, the method of calculating the sliding correlation coefficient established reliable values of the correlation coefficient from -0.94 to 0.90. It is obvious that the influence of solar activity on the increase can be modified by other factors, presumably of an astrophysical nature. The results of the performed studies demonstrate a good agreement with the hypothesis of M.G. Romanovsky and R.V. Shchekalyov that the influence of solar activity on growth can be modified by the influence of galactic radiation. The obtained conclusions provide a basis for revising and analyzing in a different way the previously obtained data on the relationship between the dynamics of radial growth of trees and fluctuations in the value of Wolf numbers, and also expand our understanding of the depth of biosphere-space relations.

Keywords. Influence of astrophysical factors in the biosphere, tree-ring analysis, *Populus tremula* L., radial growth.

Введение

Основоположником науки о солнечно-земных связях – гелиобиологии – является русский ученый Александр Леонидович Чижевский (1897-1964). В 1976 г., впервые на русском языке, была издана его книга "Земное эхо солнечных бурь" (первое издание – в 1938 г., Франция). Им указано на множество примеров влияния солнечной активности на проходящие в биосфере процессы.

Вопрос о возможной связи колебаний радиального прироста с влиянием солнечной активности был поднят на самых первых этапах становления ден-

дрохронологии (Douglass, 1919). Например, им приводятся следующие, представляющие интерес графики (рис. 1).

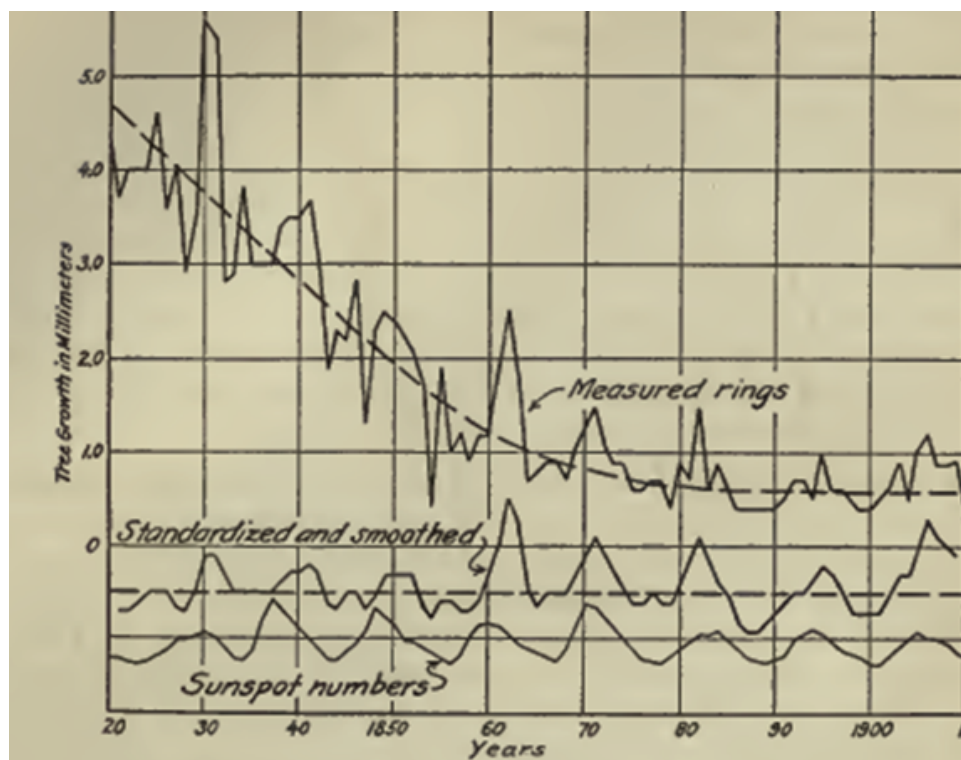


Рисунок 1. Пример связи между колебаниями солнечной активности и колебаниями ширины годичного кольца для ели из Южной Швеции (Douglass, 1919; стр. 75)

Figure 1. An example of the relationship between fluctuations in solar activity and fluctuations in the width of the annual ring for spruce from Southern Sweden (Douglass, 1919; page 75)

Обстоятельный обзор современного состояния проблемы солнечно-биосферных связей, подробную библиографию по этому вопросу содержат монографии иркутских ученых (Леви и др., 2012а; Леви и др., 2012б).

Подробные исследования данного вопроса, учитывающие в том числе опыт достаточно многочисленных предшественников, выполнены советским исследователем Н.В. Ловелиусом (1979). Он отмечает: «Разноречивые толкования связи «прирост деревьев – активность Солнца» можно объяснить, по-видимому, разнохарактерностью материала и бесконечным разнообразием используемых методов анализа, а также эпизодичностью исследований, как правило, на региональном материале, в которых эта связь выявлялась как побочный результат при решении других задач». Часто цикличность изменчивости прироста в связи с цикличностью солнечной активности фиксируется для условий степи и лесостепи (Шведов, 1892; Матвеев, 2003; Матвеев, Румянцев, 2013; Матвеев, 2014; Matveev et al., 2017).

Целью данного исследования был анализ влияния солнечной активности на колебания радиального прироста осины в условиях на границе лесной и

лесостепной зон. Дендрохронологические исследования роста рассеянно-судистых пород выполнялись достаточно редко по причине плохой различимости их годовичных колец, поэтому полученные нами данные имеют научную новизну.

Материалы и методы

Мордовский государственный природный заповедник имени П.Г. Смидовича расположен в европейской части России на северной границе лесостепной зоны. Методика сбора и получения дендрохронологического материала подробно описана в нашей предыдущей публикации (Vorobyeva et al., 2022). Средний диаметр изученных деревьев составляет 36 см, средняя высота – 32 м. Большая часть стволов деревьев имела плодовые тела осинового трутовика (*Phellinus tremulae* (Bond.) Bond. et Bor.), либо имела признаки развития гнили в стволе, которые были обнаружены на кернях. По-видимому, все исследуемые деревья одного возраста, примерно 85 лет несмотря на то, что на кернях было зафиксировано разное число годовичных колец (в том числе и по причине развития ядровой гнили). Отбиралось по 1 керню с каждого учетного дерева на высоте 1.3 м. Всего в анализ было включено 28 индивидуальных хронологий. Керны древесины смачивались водой, зачищались лезвием бритвы и натирались порошком мела для лучшего проявления структуры годовичных колец. Далее с помощью прибора Линтаб-5 производилось измерение ширины годовичных колец с точностью до 0.01 мм. Для контроля за правильностью измерений использовалась процедура перекрестной датировки в программе TSAP-Win (Rinntech). В итоге были получены индивидуальные (для каждого учетного дерева) хронологии по ширине годовичного кольца. На их основе выполнялись дальнейшие расчеты в программе Microsoft Excel.

В частности, на основе стандартной функции Microsoft Excel рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона между временными рядами анализируемых показателей. Далее на основе предложенной нами методики рассчитывался скользящий коэффициент корреляции: в этом случае для расчета берется лишь отдельный временной интервал временного ряда и путем последовательного сдвигания этого временного «окна» на один год отслеживается динамика изменения сопряженности анализируемых показателей (Румянцев, 2011).

Для удаления из временного ряда возрастного тренда использовалась процедура индексирования: ширина годовичного кольца каждого года делилась на ширину годовичного кольца за последние 5 лет, на основании индивидуальных индексированных хронологий рассчитывалась средняя индексированная хронология (Румянцев, 2011).

Значения параметров солнечной активности (чисел Вольфа) с 1823 по 2022 гг. были получены с сайта <https://meteo-dv.ru/geospace/AverageMonthW/>. Для выполнения анализа Фурье использовалась лицензионная версия программы STATISTICA 13,0.

Результаты

На основании индивидуальных хронологий была получена средняя для древостоя хронология (рис. 2). С ее помощью методом визуального анализа были выявлены локальные максимумы и локальные минимумы прироста.

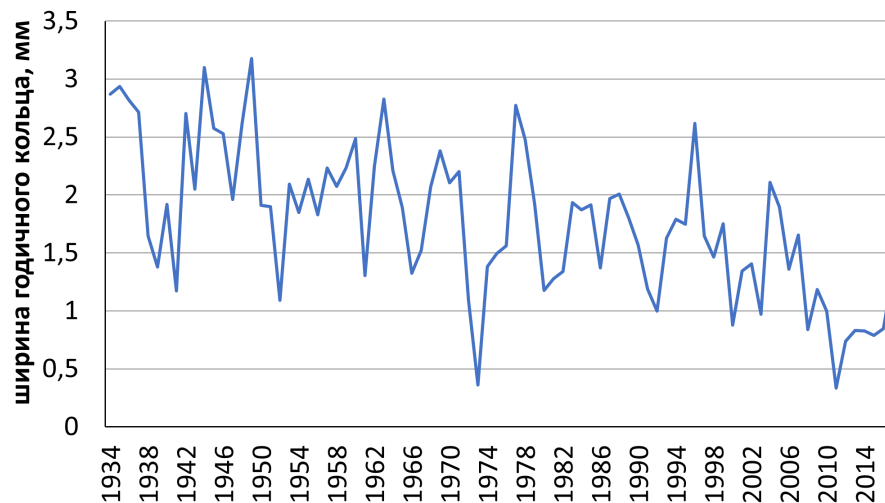


Рисунок 2. Среднее значение ширины годичного кольца для исследуемого древостоя осины по годам

Figure 2. The average value of the annual ring width for the studied aspen stand by years

На основе анализа графика к годам локальным минимумам прироста отнесены 1941, 1952, 1961, 1966, 1973, 1980, 1992, 2000, 2011 гг. Промежутки между минимумами составляют следующие количества лет: 11, 9, 5, 7, 7, 12, 11 и в среднем интервал между минимумами равен 8.8 лет. Локальные максимумы прироста наблюдались в 1944, 1949, 1963, 1969, 1977, 1996, 2004, 2015 гг. Промежутки между максимумами составляют следующие количества лет: 5, 14, 6, 8, 19, 8, 11 и в среднем интервал между максимумами равен 10 лет. Таким образом средние интервалы между минимумами и между максимумами практически совпадают: 9 и 10 лет.

Выполненное ранее дендроклиматическое исследование с использованием метода климаграмм (Ловелиус, 1979; Румянцев, 2011) показало четкую разницу в среднем количестве осадков в мае и июне в годы с минимумами прироста за период 1960-2021 гг. (Vorobyeva et al., 2022). Средние значения среднемесячных температур воздуха в годы экстремумов прироста близки к средним многолетним показателям. Влияние осадков мая и июня проявляется и при анализе метеоусловий в годы максимумов прироста.

При этом для лет минимумов прироста наблюдаются повышенные осадки мая и пониженные осадки июня. Это означает, что такого рода комбинация во временном распределении осадков негативно влияет на физиологическое состояние деревьев осины. Обильная влага в мае может стимулировать рост

тонких корней, а также формирование большой биомассы кроны, что требует поступления больших объемов воды и минеральных веществ. При таких начальных параметрах внезапное наступление засухи в июне приводит к резкому ухудшению состояния осины. Таким образом, не только среднее месячное значение метеопараметров, но и взаимная комбинация этих значений может влиять на отличия по размерам в годичных кольцах деревьев, что редко учитывается в дендроклиматических исследованиях.

Результаты визуального анализа цикличности колебаний прироста были проверены на основе формальной процедуры анализа Фурье с использованием окна Хемминга. Полученную в результате спектрограмму отражает график на рис. 3.

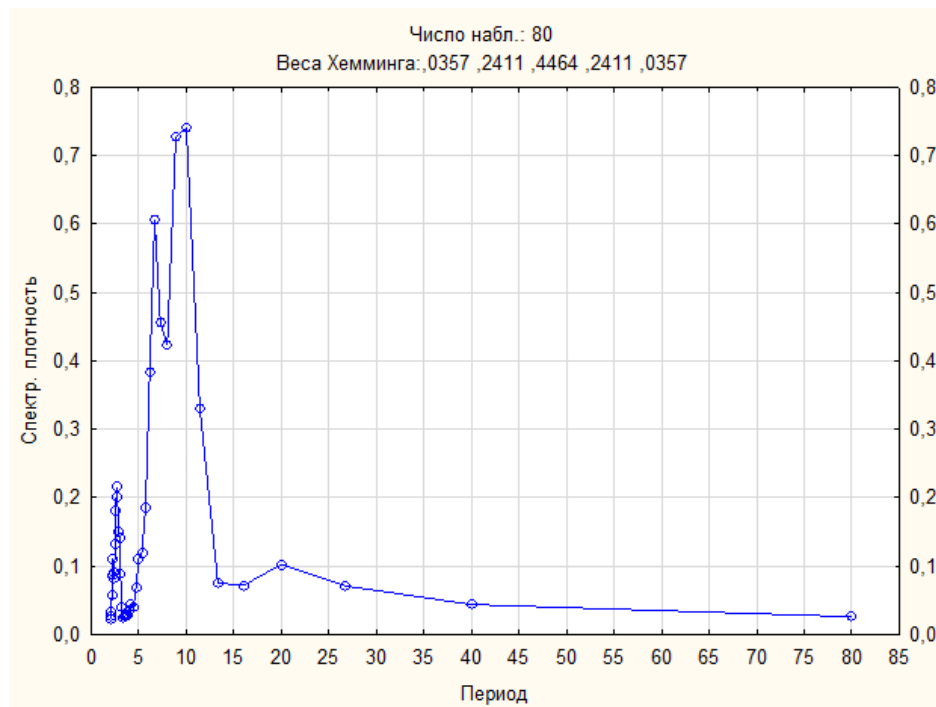


Рисунок 3. Результаты спектрального анализа Фурье для индексированной хронологии осины из Мордовского заповедника за период 1938-2017 гг.

Figure 3. Results of Fourier spectral analysis for the chronology of aspen from the Mordovian Reserve for the period 1938-2017

Из данных спектрограммы видно, что в колебаниях прироста четко выражена циклическая компонента с периодом 10 лет и 8.9 лет (результаты совпадают с результатами визуального анализа цикличности прироста: 10 лет для максимумов прироста и 9 лет для минимумов прироста). Также выражены циклические компоненты с периодом 6.7 и 2.8 лет. Подобного рода периодичность может быть связана с эндогенными процессами в организме деревьев, например с циклами семеношения (Романовский, 1992).

Коэффициент корреляции между хронологией по ширине годичного кольца (рис. 2) и временным рядом чисел Вольфа за период 1938-2017 гг.

равен 0, что, по всей видимости, связано с влиянием возрастного тренда во временном ряду изменчивости прироста. Удалить временной тренд возможно с помощью процедуры индексации, например, отнеся каждое значение ширины годичного кольца, к средней ширине годичного кольца за последние пять лет, и затем на основе индивидуальных индексированных хронологий рассчитав среднюю индексированную хронологию (Румянцев, 2010). Коэффициент корреляции между индексированным рядом и рядом чисел Вольфа за период 1938-2017 гг. равен -0.24 , он значим при уровне доверительной вероятности 0.05, однако его значение лежит фактически на границе порога значимости. При этом следует учесть, что этот коэффициент достаточно высок для подобного рода исследований. Так С.М. Матвеев (2003), исследуя рост сосны обыкновенной в условиях Центральной лесостепи, обнаружил, что корреляционный анализ дает низкую тесноту прямолинейной связи: коэффициент корреляции не превышал 0.1. Очевидно, что влияние солнечной активности сказывается и на динамике климатических факторов (Матвеев, Румянцев, 2013). Но при этом важно учитывать, что динамика климатических факторов может иметь и иную природу обусловленности, а климатические факторы сами по себе оказывают прямое влияние на интенсивность физиологических процессов в организме дерева, активность камбия и радиальный прирост (Fritts, 1976; Ваганов, Шашкин, 2000). Графики временных рядов отражает рис. 4.

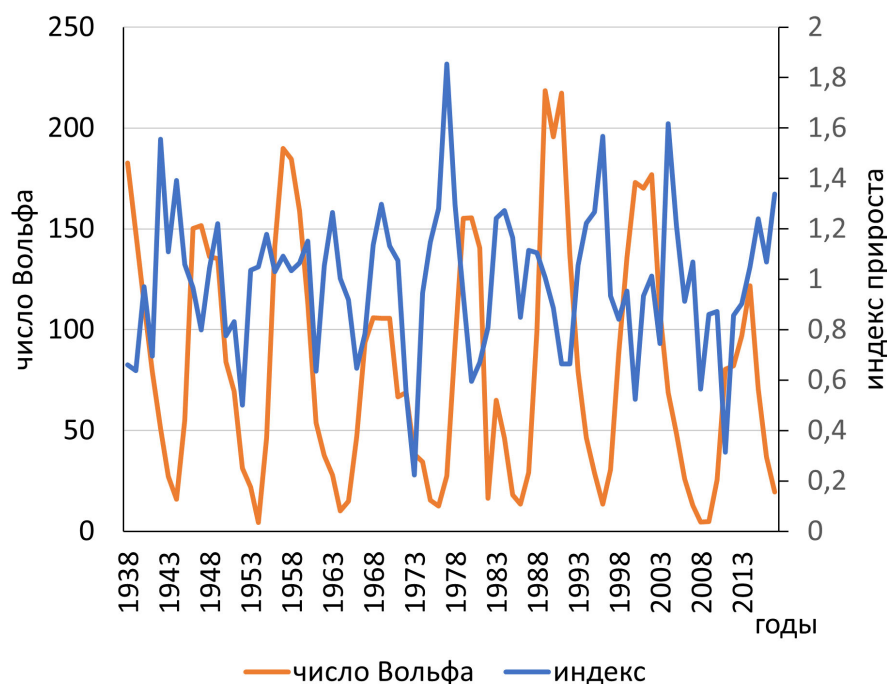


Рисунок 4. Сравнительная динамика индексов прироста осины и чисел Вольфа

Figure 4. Comparative dynamics of aspen growth indices and Wolf numbers

При визуальном анализе графиков на рис. 4 отрицательная связь между индексами прироста и солнечной активностью прослеживается достаточно четко. Еще одним вариантом сепарирования дендрохронологической информации в данном случае является рассмотрение динамики среднего текущего прироста за пять лет в связи с динамикой чисел Вольфа (рис. 5). Следует учитывать, что значение индекса прироста в 2017 г. представляет собой отношение ширины годовичного кольца в 2017 г. к средней ширине кольца за период 2013-2017 гг. При иных вариантах индексации значения индексов прироста будут несколько иными.

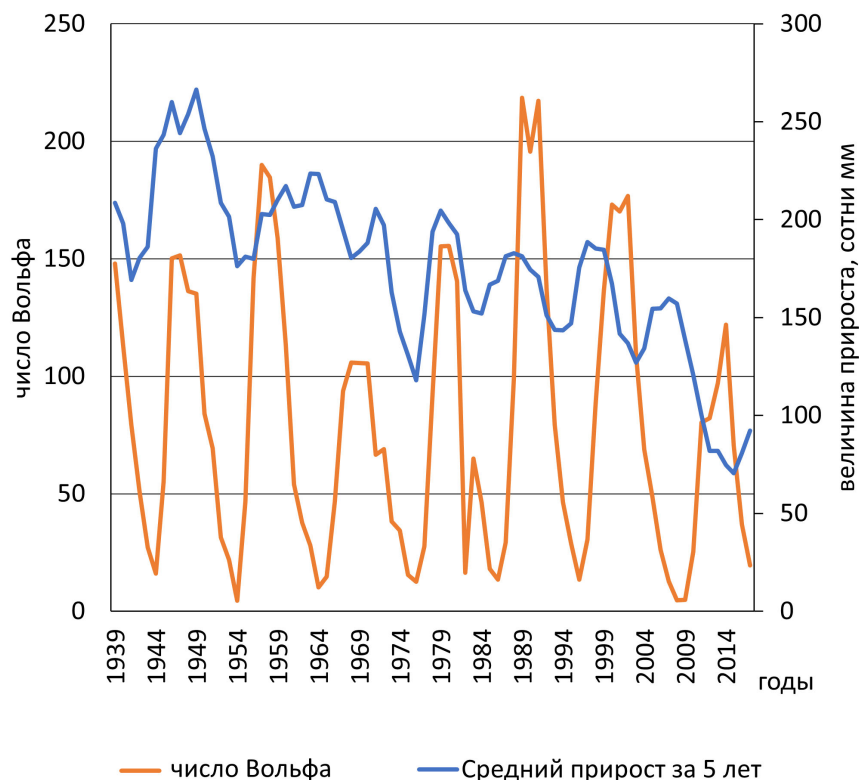


Рисунок 5. Сравнительная динамика текущего радиального прироста за пять лет и чисел Вольфа

Figure 5. Comparative dynamics of the current radial growth over five years and the Wolf numbers

Коэффициент корреляции между представленными на графике рядами равен 0.18, на уровне доверительной вероятности 0.05 он не значим и причины этого хорошо ясны при корреляционном анализе: есть участки, когда динамика прироста практически полностью повторяет динамику чисел Вольфа (например, 1939-1955; 1972-1984 гг.) и есть участки, где колебания двух величин находятся в противофазе (например, 2000-2016 гг.). Для анализа такого рода феномена наилучшим образом подойдет расчет скользящего коэффициента корреляции между рядами. График на рис. 6 отражает динамику скользящего коэффициента корреляции Пирсона за 11 лет.

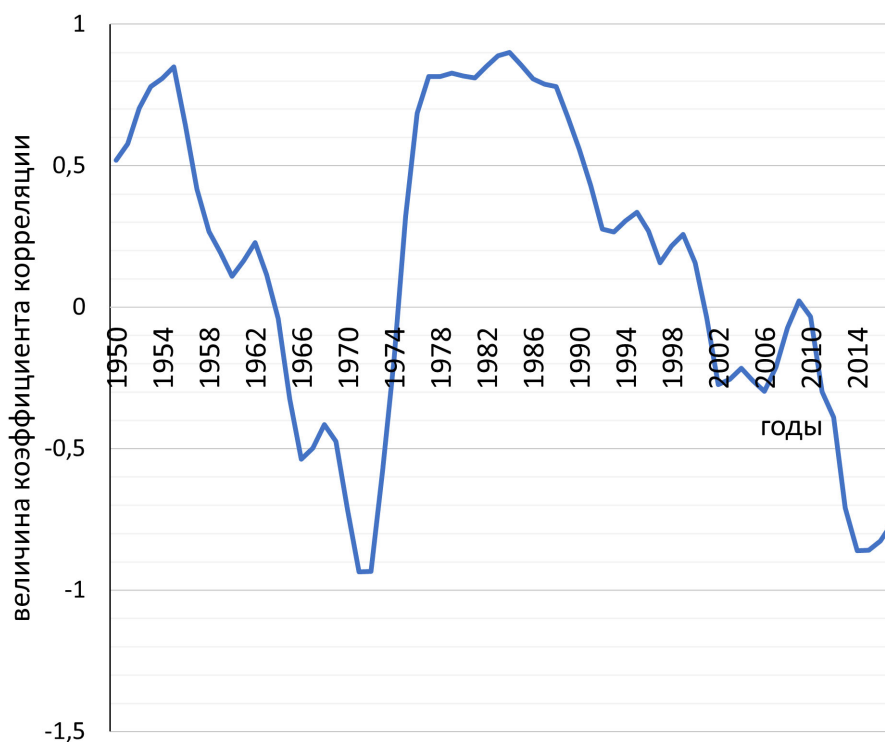


Рисунок 6. Динамика скользящего коэффициента корреляции за 11 лет между средним текущим радиальным приростом за пять лет и числами Вольфа

Figure 6. Dynamics of the sliding correlation coefficient over 11 years between the average current radial growth over five years and the Wolf numbers

При данных условиях расчета на уровне доверительной вероятности 0.05 значимы значения коэффициента корреляции от 0.60. Достоверная положительная корреляция наблюдается для периодов 1941-1956, 1966-1990 гг. Достоверная отрицательная корреляция наблюдается для периодов 1960-1973; 2003-2017 гг. В целом, значения скользящего коэффициента корреляции варьируют фактически от -1 (-0.93; -0.86) до +1 (0.85; 0.90).

Обсуждение результатов

Полученные результаты подтвердили ранее известную информацию о наличии связей между колебаниями ширины годичных колец деревьев и колебаниями солнечной активности. Достаточно хорошо известно, что эти связи невелики по тесноте, не стабильно проявляются в изменчивости прироста у деревьев разных видов и из разных географических районов, но тем не менее их существование не вызывает сомнений у серьезных исследователей. В нашем случае относительно новым наблюдением является факт не стационарности проявления связей прироста и солнечной активности на разных участ-

ках временного ряда изменчивости радиального прироста. Это наблюдение не является единичным: ранее мы наблюдали аналогичный феномен на дендрохронологическом материале «Лиственницы Петра I» из Аптекарского огорода Ботанического сада МГУ им. Ломоносова (Румянцев и др., 2018). По-видимому, существует фактор, способный существенным образом модифицировать характер влияния солнечной активности на прирост. В итоге рассматривая процесс для всей длины временного ряда, содержащего разного рода природы участки связи, мы получаем некоторую усредненную в коэффициенте корреляции оценку, как правило, находящуюся на границе достоверности. Обсуждая природу этого фактора, прежде всего имеет смысл обсудить экофизиологический механизм влияния солнечной активности на прирост.

Согласно традиционной точке зрения солнечная активность определяет не только режим верхних слоев атмосферы, но и весь характер тропосферной циркуляции, то есть ее интенсивность и тип. А так как современные изменения климата зависят лишь от колебаний циркуляционного режима, то астрофизической первопричиной современных климатических изменений является солнечная активность (Эйгенсон, 1963; Матвеев, Румянцев, 2013). Общая циркуляция атмосферы трансформирует солнечную активность в цикличность колебаний температуры, неравномерность выпадения осадков, регулярную повторяемость тайфунов, ураганов, гроз. Одним словом, традиционно влияние солнечной активности рассматривается через ее влияние на климат, влияние климата на процессы первичного метаболизма в организме дерева и в конечном итоге на колебания продуктивности древесины от года к году.

Альтернативная точка зрения была предложена российскими исследователями М.Г. Романовским и Р.В. Щекалевым (2009). Они предложили гипотезу о связи колебаний продуктивности с мутационно-репарационными процессами в камбиальной ткани. Чтобы исправить повреждения генома клеткам (ядрам) необходимо делиться, а организму, ткани – расти. Увеличение скорости мутирования требует ускорения репарации и, соответственно, возрастания интенсивности делений и увеличения годичной продукции фитоценозов. При очень сильном давлении мутационного процесса митотическая репарация становится мало эффективной, не справляется с образованием мутаций и прекращается. Продуктивность особей и ценозов резко падает. Клетки, ткани, организмы переходят к минимальной интенсивности делений и общего метаболизма. При делительной активности тканей, инициируемой потребностями митотической репарации, обычные ограничения продуктивности, вероятно, не работают: скорость роста должна точно соответствовать скорости поступления новых мутаций за время клеточного цикла.

Авторы задаются вопросом: «Какова же амплитуда колебаний естественного мутационного фона?». И делают вывод, что основные источники мутационных повреждений – это в том числе потоки высокоэнергетических частиц космических лучей (солнечных и галактических). Крайне важно наблюдение авторов о том, что связи между пятнообразованием на Солнце и колебательными процессами в биосфере локальны, темпоральны и чаще всего прослеживаются на ограниченных отрезках времени, а затем наруша-

ются. Причину этого авторы видят в том, что интенсивность потока космических лучей в зависимости от солнечной активности приобретает нелинейный характер с двумя максимумами: меньшим в области минимальных значений чисел Вольфа и максимальной галактической составляющей, и основным – в области максимальных абсолютных значений чисел Вольфа и минимальных значений, составляющей галактического излучения. Частоту мутаций определяет суммарный поток космических лучей. Космические лучи индуцируют нарушения в геноме. Продуктивность тканей клеточных ансамблей растет. Однако после превышения определенного порога клетки и особи начинают терять способность к репарации, продуктивность дерева сокращается. Характер взаимодействия двух рассматриваемых компонент космического излучения авторы охарактеризовали в виде следующего графика (рис. 7).

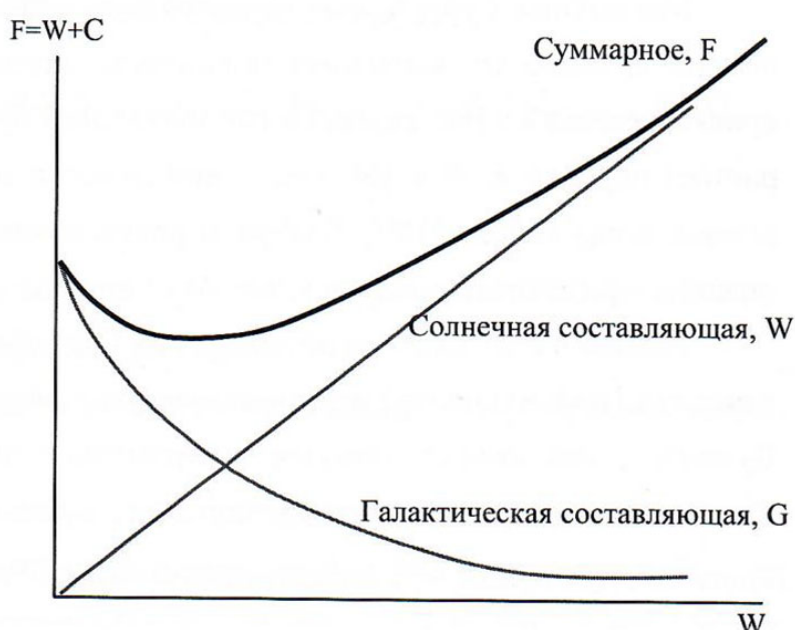


Рисунок 7. Концептуальная модель, объясняющая зависимость интенсивности космического излучения от солнечной активности (Романовский, Щекалев, 2009; стр. 24)

Figure 7. A conceptual model explaining the dependence of the intensity of cosmic radiation on solar activity (Romanovsky, Shchekalyov, 2009; p. 24)

Графики на рис. 7 отражают положение о том, что интенсивность солнечной составляющей космических лучей примерно пропорциональна интенсивности пятнообразования W . Галактическая составляющая G , наоборот максимальна при отсутствии солнечного магнитного поля и вихрей (пятен) в солнечной плазме, т.е. при значениях числа Вольфа близких к нулю.

Таким образом, нами получены результаты не объяснимые в рамках традиционных представлений о характере влияния солнечной активности на прирост. Однако в рамках весьма сложно организованной гипотезы Романовского-Щекалева наши результаты объяснимы в полной мере и служат дополнительным подтверждением справедливости разработанной ими концепции.

Заключение

Современная концепция дендроклиматического моделирования и реконструкции климатов прошлых эпох базируется на двух основных постулатах: принципе актуализма Лайеля в случае дендроклиматологии подразумевающего стационарность климатического сигнала по всей длине хронологии и представления о влиянии климата на прирост через процессы первичного метаболизма в организме дерева. Данные представления безусловно удобны для решения реконструктивистских задач. Однако есть факты, которые заставляют быть более внимательными к безоговорочному принятию данной концепции, в частности как показано в данном исследовании это наличие не климатических компонент изменчивости прироста и нестационарный их характер влияния на динамику прироста.

Список литературы

Ваганов, Е.А., Шашкин, А.В. (2000) *Рост и структура годичных колец хвойных*, Новосибирск, Наука, 122 с.

Леви, К.Г., Задонина, Н.В., Язев, С.А., Воронин, В.И. (2012а) *Современная геодинамика и гелиогеодинамика*, Иркутск, Изд-во ИГУ, 539 с.

Леви, К.Г., Задонина, Н.В., Язев, С.А., Воронин, В.И., Наурзбаев, М.М., Хантемиров, Р.М. (2012б) *Гелиогеодинамика: Природные аспекты глобальных солнечных минимумов*, т. 1, Иркутск, Изд-во ИГУ, 511 с.

Ловелиус, Н.В. (1979) *Изменчивость прироста деревьев. Дендроиндикация природных процессов и антропогенных явлений*, Л., Наука, 231 с.

Матвеев, С.М. (2003) *Дендроиндикация динамики состояния сосновых насаждений Центральной Лесостепи*, Воронеж, ВГУ, 269 с.

Матвеев, С.М., Румянцев, Д.Е. (2013) *Дендрохронология*, Воронеж, ВГЛТА, 139 с.

Матвеев, С.М. (2014) Цикличность в динамике радиального прироста естественных и искусственных сосновых древостоев в борах Центральной лесостепи, *Вестник Московского государственного университета леса*, № 5(18), с. 110-116.

Романовский М.Г. (1992) Перспективы моделирования динамики годичного прироста древесных растений как функции абиотических факторов, *Научн. тр. МЛТИ*, вып. 256, с. 72-74.

Романовский, М.Г., Щекалев, Р.В. (2009) *Лес и климат Центральной полосы России*, Архангельск, Правда Севера, 110 с.

Румянцев, Д.Е. (2010) *История и методология лесоводственной дендрохронологии*, М., МГУлеса, 109 с.

Румянцев (2011). *Потенциал использования дендрохронологической информации в лесной науке и практике*, дис. ... д-ра биол. наук, М., МГУЛ, 354 с.

Румянцев, Д.Е., Черакшев, А.В., Ряхина, К.Н. (2018) *Космические факторы и уход за деревьями в урбанизированной среде, Сборник материалов общероссийской научно-практической конференции «Взгляд молодых исследователей: лесной комплекс, экономика и управление»*, М., МФ МГТУ, с. 130-131.

Чижевский, А.Л. (1976) *Земное эхо солнечных бурь*, М., Мысль, 367 с.

Шведов, Ф.Н. (1972) *Дерево как летопись засух (1892 по 1972), Материалы Второго Всесоюзного совещания по дендрохронологии и дендроклиматологии «Дендроклиматохронология и радиоуглерод»*, Каунас, Ин-т ботаники АН СССР, с.17-26.

Эйгенсон, М.С. (1963) *Солнце, погода и климат*, Л., Гидрометеиздат, 274 с.

Douglass, A.E. (1919) *Climatic cycles and tree-growth. A study the annual rings of trees in relation to climate and solar activity*, Washington, Carnegie Institution, 127 p.

Fritts, H.C. (1976) *Tree rings and climate*, London, New York, San Francisco, Academic press, 576 p.

Matveev, S.M., Chendev, Yu.G., Lupo, A.R., Hubbart, J.A., Timashchuk, D.A. (2017) Climatic changes in the East-European forest-steppe and effects on Scots pine productivity, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 174, no. 1, pp. 427-443, doi: 10.1007/s00024-016-1420-y.

Vorobyeva, N.S., Rumyantsev, D.E., Melikhova, M.A. (2022) Study of the radial growth dynamics of the aspen (*Populus tremula* L.) at the north border of forest-steppe zone of the European part of Russia (Mordovian Reserve), *Journal of Agriculture and Environment*, no. 2 (22), pp. 1-6, doi: 10.23649/jae.2022.2.22.02.

References

Vaganov, E.A., Shashkin, A.V. (2000) *Rost i struktura godichnyh kolec hvoynyh* [Growth and structure of annual rings of conifers], Nauka, Novosibirsk, Russia, 122 p.

Levi, K.G., Zadonina, N.V., Yazev, S.A., Voronin, V.I. (2012a) *Sovremennaya geodinamika i geliogeodinamika* [Modern geodynamics and heliogeodynamics], Irkutsk, Russia, 539 p.

Levi, K.G., Zadonina, N.V., Yazev, S.A., Voronin, V.I., Naurzbaev, M.M., Hantemirov, R.M. (2012b) *Geliogeodinamika: Prirodnye aspekty global'nyh solnechnykh minimumov* [Heliogeodynamics: Natural aspects of global solar minima], vol. 1, Irkutsk, Russia, 511 p.

Lovelius, N.V. (1979) *Izmenchivost' prirosta derev'ev. Dendroindikaciya prirodnih processov i antropogennyh yavlenij* [Variability of tree growth. Dendroindication of natural processes and anthropogenic phenomena], Nauka, Leningrad, Russia, 231 p.

Matveev, S.M. (2003) *Dendroindikaciya dinamiki sostoyaniya sosnovykh nasazhdenij Central'noj Lesostepi* [Dendroindication of the dynamics of the state of pine plantations in the Central Forest-steppe], Voronezh, Russia, 269 p.

Matveev, S.M., Romyancev, D.E. (2013) *Dendrohronologiya* [Dendrochronology], Voronezh, Russia, 139 p.

Matveev, S.M. (2014) *Ciklichnost' v dinamike radial'nogo prirosta estestvennykh i iskusstvennykh sosnovykh drevostoev v borah central'noj lesostepi* [Cyclicality in the dynamics of radial growth of natural and artificial pine stands in the forests of the Central forest-steppe], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa*, no. 5(18), pp. 110-116.

Romanovskij, M.G. (1992) *Perspektivy modelirovaniya dinamiki godichnogo prirosta drevesnykh rastenij kak funkcii abioticheskikh faktorov* [Prospects for modeling the dynamics of annual growth of woody plants as a function of abiotic factors], *Nauchn. tr. MLTI*, issue 256, pp.72-74

Romanovskij, M.G., Shchekalev, R.V. (2009) *Les i klimat Central'noj polosy Rossii* [Forest and climate of Central Russia], Pravda Severa, Arhangel'sk, Russia, 110 p.

Romyancev, D.E. (2010) *Istoriya i metodologiya lesovodstvennoj dendrohronologii* [History and methodology of forestry dendrochronology], Moscow, Russia, 109 p.

Romyancev, D.E. (2011) *Potencial ispol'zovaniya dendrohronologicheskoy informacii v lesnoj nauke i praktike* [The potential of using dendrochronological information in forest science and practice], Doctor's thesis, Moscow, Russia, 354 p.

Romyancev, D.E., Cherakshev, A.V., Ryahina, K.N. (2018) *Kosmicheskie faktory i uhod za derevyami v urbanizirovannoj srede* [Space factors and tree care in an urbanized environment], *Sbornik materialov obshcherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Vzglyad molodykh issledovatelej: lesnoj kompleks, ekonomika i upravlenie»* [Collection of materials of the all-Russian scientific-practical conference "The view of young researchers: the forest complex, economics and management"], Moscow, Russia, p. 130-131.

Chizhevskij, A.L. (1976) *Zemnoe ekho solnechnykh bur'* [Earth's echo of solar storms], Moscow, Russia, 367 p.

Shvedov, F.N. (1972) *Derevo kak letopis' zasuh (1892 po 1972)* [The tree as a chronicle of droughts (1892 to 1972)], *Materialy Vtorogo Vsesoyuznogo soveshchaniya po dendrohronologii i dendroklimatologii «Dendroklimatohronologiya i radiouglerod»* [Proceedings of the Second All-Union Conference on Dendrochronology and Dendroclimatology "Dendroclimatochronology and Radiocarbon"], Institute of Botany of the Academy of Sciences of the USSR, Kaunas, USSR, pp. 17-26.

Ejgenson, M.S. (1963) *Solnce, pogoda i klimat* [Sun, weather and climate], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 274 p.

Douglass, A.E. (1919) *Climatic cycles and tree-growth. A study the annual rings of trees in relation to climate and solar activity*, Washington, Carnegie institution, 127 p.

Fritts, H.C. (1976) *Tree rings and climate*, London, New York, San Francisco, Academic press, 576 p.

Matveev, S.M., Chendev, Yu.G., Lupo, A.R., Hubbart, J.A., Timashchuk, D.A. (2017) Climatic changes in the East-European forest-steppe and effects on Scots pine productivity, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 174, no. 1, pp. 427-443, doi: 10.1007/s00024-016-1420-y.

Vorobyeva, N.S., Rumyantsev, D.E., Melikhova, M.A. (2022) Study of the radial growth dynamics of the aspen (*Populus tremula* L.) at the north border of forest-steppe zone of the European part of Russia (Mordovian Reserve), *Journal of Agriculture and Environment*, no. 2 (22), pp. 1-6, doi: 10.23649/jae.2022.2.22.02.

Поступила в редакцию: 27.08.2022.

Доработана после рецензирования: 04.04.2023.

Для цитирования / For citation:

Румянцев, Д.Е. Воробьева, Н.С. (2023) Влияние солнечной активности на рост осины в условиях мордовского заповедника, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 1-2, с. 128-142, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-128-142.

Rumyantsev, D.E., Vorobieva, N.S. (2023) Influence of solar activity on aspen growth in the conditions of the mordovian nature reserve, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no. 1-2, pp. 128-142, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-128-142.

Как самые обычные люди помогают науке*В.П. Захаров*

ГКУ МО «Мособллес»,
Россия, 143082, Московская область, Одинцовский городской округ, деревня Раздоры,
Рублёво-Успенское шоссе, 1-й километр

Адрес для переписки: zakharov@forest.ru

Реферат. Прогресс в технологиях передачи данных и в характеристиках гаджетов сделал возможным вовлечение в работы по документированию биологического разнообразия и происходящих в природе динамических процессов широкого круга энтузиастов и любителей природы. Массивы данных iNaturalist и других систем сбора и верификации информации от пользователей уже используются для составления и уточнения различных ареалов, мониторинга редких видов, отслеживания распространения инвазий, инвентаризации флоры и фауны особо охраняемых природных территорий, фенологических исследований и решения многих других научных и прикладных задач, в качестве как основного, так и дополнительного источника. Важные сведения, полученные из данных систем, могут стать интересным дополнением к полевым материалам, полученным исследователями в ходе самостоятельного сбора данных. Опыт использования подходов гражданской науки показал перспективность их использования в образовательных проектах и программах.

Ключевые слова. Гражданская наука, iNaturalist, GBIF, биологическое разнообразие.

How ordinary people help science*V.P. Zakharov*

GKU MO «Mosoblles»,
Razdory village, Rublevo-Uspenskoe highway, 1st kilometer, 144082, Odintsovo urban district,
Moscow region, Russian Federation

Correspondence address: zakharov@forest.ru

Abstract. Advances in data transmission technologies and gadget characteristics have made it possible to involve a wide range of enthusiasts and nature lovers in the work of documenting biological diversity and the dynamic processes occurring in nature. Data files of iNaturalist and other systems for collecting and verifying information from users are already exploited to compile and refine various areals, monitor rare species, invasions spread track, natural

reserves flora and fauna inventory, phenological research and solve many other scientific and applied problems, in as both primary and secondary source. Important information obtained from these systems can be an interesting addition to the field materials obtained by researchers during data collection. The experience of citizen science approaches using has shown the perspectivity of their practice in educational projects and programs.

Keywords. Citizen science, iNaturalist, GBIF, biological diversity.

Проведение научных исследований с привлечением большой сети непрофессиональных исследователей получило название гражданской науки (англ. Citizen science). Несмотря на то, что сам этот термин стал популярным лишь в последние годы, на протяжении ряда столетий непрофессиональные ученые не только занимались научными исследованиями, но и совершали открытия в самых разных областях знаний.

К примеру, видный политический деятель США и по совместительству великий ученый и естествоиспытатель Бенджамин Франклин, при помощи своих знаменитых опытов с воздушным змеем доказал электрическую природу молний (рис. 1а), немецкий предприниматель и археолог-самоучка Генрих Шлиман открыл Трою, а Чарльз Дарвин создал свою теорию эволюции на основе данных, собранных им из любопытства (рис. 1б).

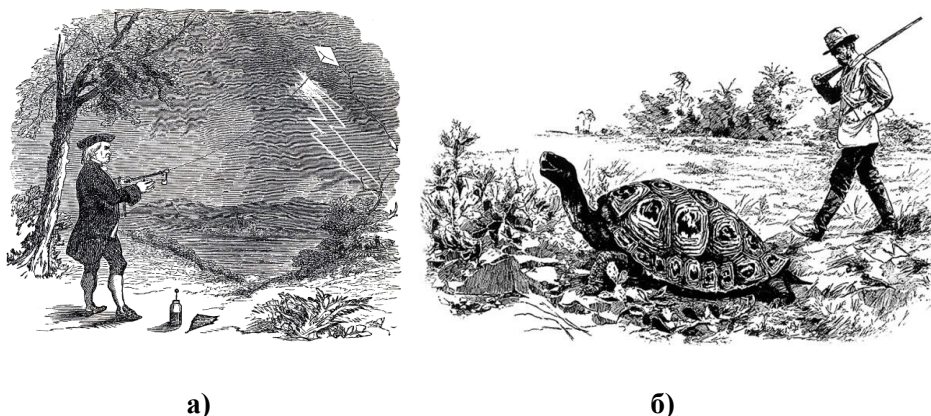


Рисунок 1. Бенджамин Франклин проводит знаменитый эксперимент с воздушным змеем (Hooker, 1879) (а); Чарльз Дарвин определяет максимальную скорость черепахи (Darwin and Elephant Tortoise, artwork by M. Nugent; Holder, 1891) (б)

Figure 1. Benjamin Franklin conducts the famous kite experiment (Hooker, 1879) (a); Charles Darwin determines the maximum speed of a turtle (Darwin and Elephant Tortoise, artwork by M. Nugent; Holder, 1891) (б)

Богатые традиции имеет народный мониторинг в России. Еще в 1838 г. «Журнал садоводства» обращался к своим читателям с призывом наблюдать и отмечать особенности сезонных изменений развития или поведения местных видов растений и животных (Крюкова, Данченко, 2013). На сегодняшний день

данные многолетних фенологических наблюдений, проводимых с участием многочисленных энтузиастов – единственный массовый, сопоставимый и достоверный источник информации о реакции живой природы на изменения климата, об изменениях в сезонном развитии природы регионов и России в целом (Телеганова, 2022).

Гражданская наука и гражданские ученые могут, верят энтузиасты, сделать науку демократичной, чтобы об открытиях узнавали не только из публикаций, но и сами участники исследований чувствовали причастность к происходящему – ведь их именами называют открытые небесные тела, новые виды живых организмов. Научные институты при этом получают дополнительную возможность сбора и анализа данных – большой и бесплатный ресурс. Некоторые программы разработаны специально для школьников – и с точки зрения вложения в будущее, это по-настоящему важно. За последние 20 лет в научных проектах приняли участие десятки миллионов непрофессионалов (Бакал, 2020).

Активному росту популярности проектов гражданской науки способствует прогресс в технологиях передачи данных и в характеристиках гаджетов – планшеты, телефоны с фото- и видеокамерами сделали сбор и верификацию информации делом гораздо более доступным, и ориентировочно с 2010-х годов объем получаемых данных растет практически взрывообразно. Подобные проекты реализуются в различных областях науки, но наиболее заметен вклад любителей в изучение биологических объектов.

Так, технологии и интерес энтузиастов дают возможность получать сведения о биологическом разнообразии конкретных регионов и всей планеты в целом. Все подтвержденные экспертами данные вливаются в Global Biodiversity Information Facility (GBIF)¹, где агрегируются 50 тыс. баз данных, и где сейчас находится более 2 млрд точек в свободном доступе (рис. 2). Чаще всего нужны данные о том, где растет то или иное растение или обитает конкретное животное – это основной источник пространственных данных о биоразнообразии (рис. 3) (Кириллов, 2020).

Популярность ресурс приобрел в том числе и благодаря постоянно развивающемуся алгоритму «компьютерного зрения», помогающему верно определить объект съемки. Если вид в принципе возможно определить по фотографии, технологии искусственного интеллекта с большой долей вероятности дают верные рекомендации по его определению на основе анализа базы изображений, а также времени и места съемки. Для подтверждения сделанного определения наблюдения его оценивают эксперты, лишь после их оценки наблюдение получает так называемый «исследовательский» статус и может быть экспортировано в GBIF.

Активно развивающимся инструментом гражданской науки является платформа iNaturalist², используемая как база для различных тематических или

¹) Глобальная информационная система по биоразнообразию, www.gbif.org

²) www.inaturalist.org

региональных проектов по документации биологического разнообразия. Одной из ярких и динамичных отечественных инициатив, реализуемой на этой платформе – проект «Флора России и Крыма» (рис. 4), аккумулирующий сведения о сосудистых растениях (Seregin et al., 2020).

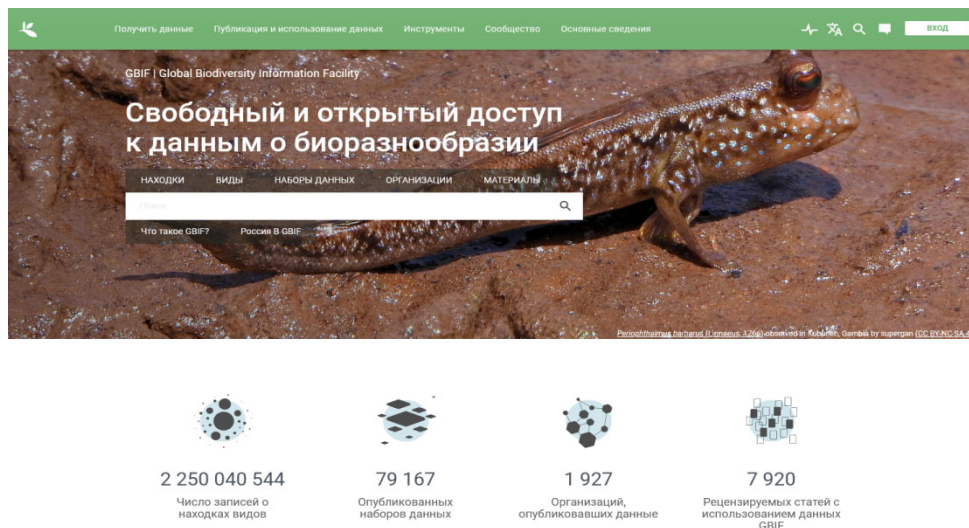


Рисунок 2. Титульная страница интернет-сайта GBIF
(На момент публикации данного материала цифры гарантированно изменятся
в большую сторону)

Figure 2. GBIF website title page
(At the time of this material publication, the numbers are guaranteed to change upwards)

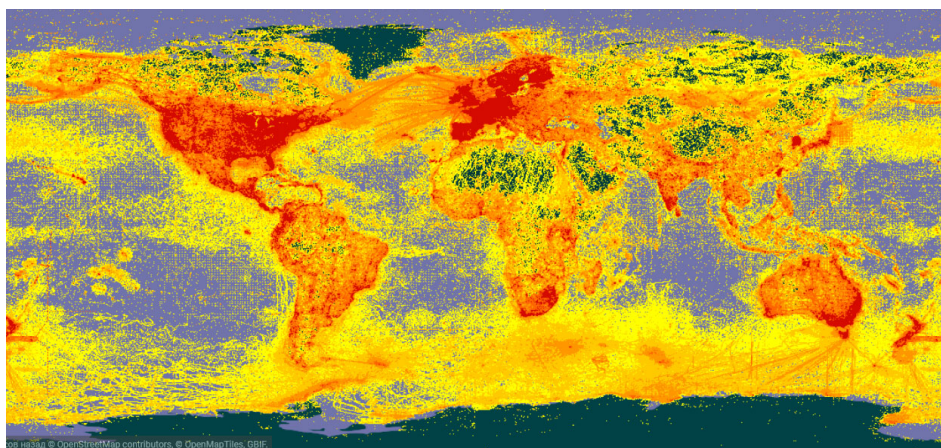


Рисунок 3. Цветовая шкала на картографическом сервисе GBIF показывает пространственное
распределение данных
(красным цветом показана наибольшая плотность)

Figure 3. The color scale on the GBIF map service shows the spatial data distribution
(the highest density is shown in red)

Кроме составления и уточнения ареалов, данные iNaturalist можно использовать для целого ряда задач: мониторинга редких видов, отслеживания распространения инвазий, инвентаризации флоры и фауны ООПТ, фенологических исследований и решения многих других научных и прикладных задач, в качестве как основного, так и дополнительного источника. Важные сведения, полученные из системы iNaturalist могут стать интересным дополнением к полевым материалам, полученным исследователями в ходе самостоятельного сбора данных. Кроме того, большинство фотографий несет много информации, помимо самого объекта живой природы: сообщество, в котором сделано наблюдение, живой напочвенный покров, вид-хозяин, фенофаза «фоновых» растений, наличие и характер снежного покрова, ледяной покров водоемов и многое другое.

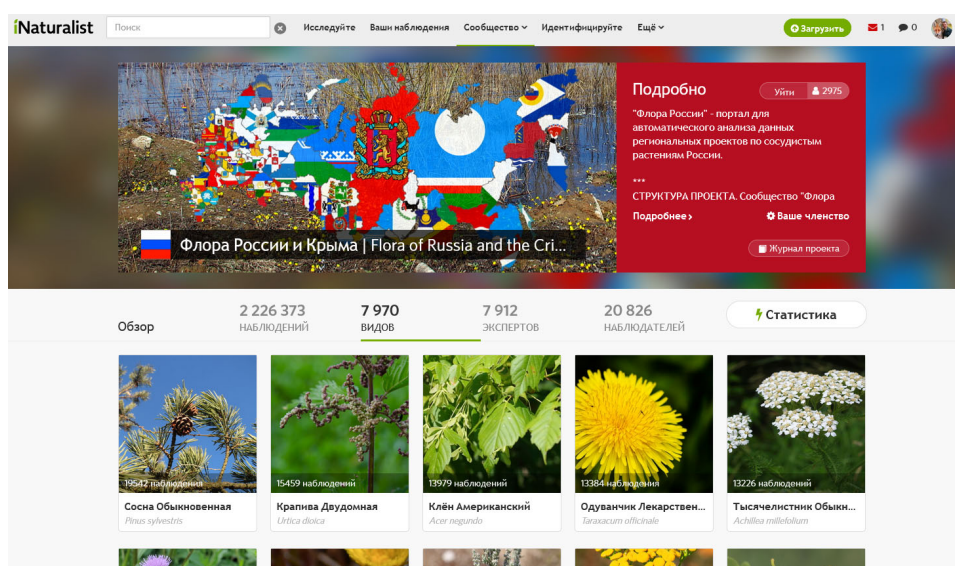


Рисунок 4. Страница интернет-сайта iNaturalist
Figure 4. iNaturalist website page

Регистрация на сайте inaturalist.org возможна с компьютера или же через специальное бесплатное приложение для смартфонов. Получив учетную запись, пользователю остается лишь загружать в свой аккаунт фотонаблюдения. Фотонаблюдение, снабженное сведениями о дате и географических координатах съемки, после определения и уточнения таксона экспертами становится частью общедоступного массива научной информации (рис. 5) (Калякин, Серегин, 2022).

Подобные системы дают возможность непрофессионалу делать профессиональные наблюдения, и в этом их главная ценность – в демократизации процесса сбора научных данных. Дополнительный важный момент заключается в том, что iNaturalist объединяет людей с профессиональными знаниями, с богатым опытом и людей, которым просто интересно, кто именно живет рядом с ними.

Принципиальная схема жизни данных

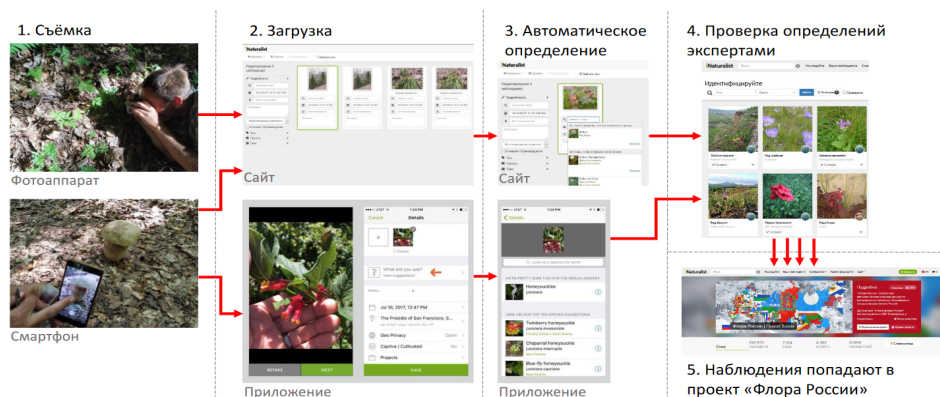


Рисунок 5. Принципиальная схема жизни данных iNaturalist

Figure 5. iNaturalist Data principal Life Concept

Данные, загруженные на портал, используются многими пользователями как своеобразный онлайн-дневник наблюдений за природными объектами, позволяющий делать выборки по периодам наблюдений, таксонам, территориям и другим параметрам (рис. 6).

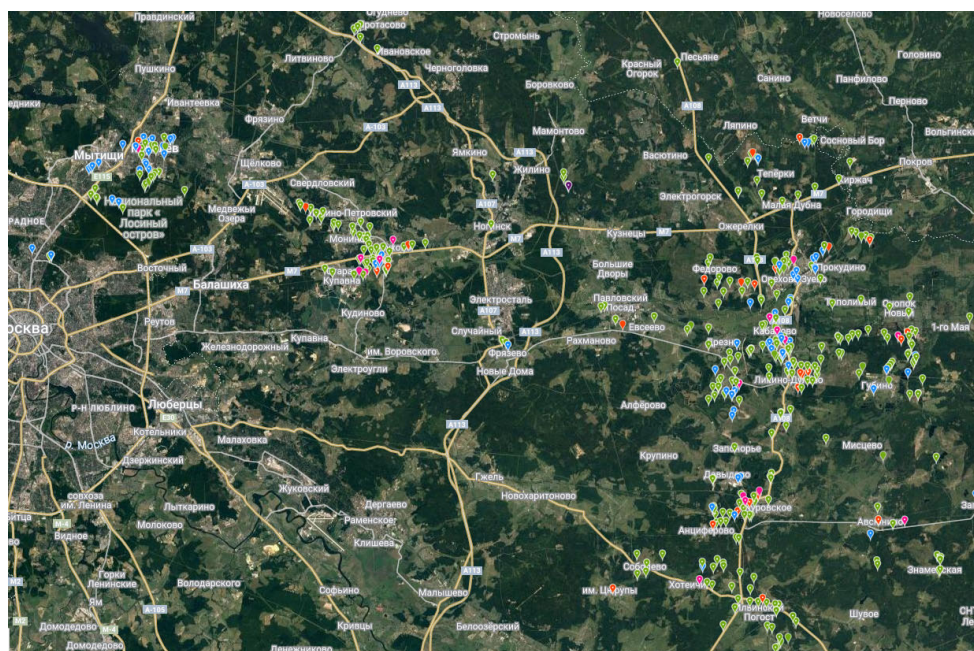


Рисунок 6. Фрагмент картографической сводки наблюдений пользователя (на примере учетной записи автора)

Различными цветами обозначены наблюдения растений, птиц, насекомых, грибов и т.д.

Figure 6. A cartographic summary fragment of the user's observations (on the example of the author's account)

Different colors indicate observations of plants, birds, insects, fungi, etc.

Еще одним удачным примером вовлечения общественности в народный мониторинг является Евразийский учет птиц – массовая акция гражданской науки, проходящая в первые выходные октября в странах Европы и Центральной Азии в формате соревнований. Учет проходит повсеместно в течение двух дней, в его подготовке задействована сеть региональных координаторов. Все сведения аккумулируются на специальном сайте eurobirdwatch.ru. Главной отличительной особенностью мероприятия является подведение итогов и определение регионов-победителей прямо в день завершения. Это дополнительно мотивирует участников (Горелова, Благовидов, 2022).

Опыт использования данных подходов и технологий показал перспективность вовлечения в проекты гражданской науки школьников, в первую очередь, членов юннатских кружков и клубов, и студентов. При заинтересованности руководителя объединения и постоянном отслеживании им загружаемых наблюдений с оперативным обсуждением сделанных находок, школьники «втягиваются в охоту» за живой природой, учатся видеть происходящие изменения и осваивают приемы определения тех или иных видов (Захаров, 2022).

Не так важно, сделаны наблюдения во время специального выезда на природные объекты, коллективной экскурсии или, как это происходило во время «самоизоляции», на даче, во время выходов из дома в магазин или прогулок с собакой – все имеет ценность.

Следует отметить, что современная эпоха ставит в качестве важной задачи формирование в среде нынешних натуралистов и полевых исследователей умений и навыков оценки качества данных и рекомендаций по сбору и оформлению наблюдений с использованием онлайн-систем. В связи с этим получение опыта применения данных технологий еще в школьном или студенческом возрасте поможет будущему специалисту быстрее освоиться в динамично развивающейся профессиональной среде.

Список литературы

Бакал, Л. (2020) *Как обычные люди помогают науке (и вы тоже можете). Просто найдем галактику*, Интернет-издание «Мел», электронный ресурс, URL: https://mel.fm/ucheba/fakultativ/7126408-citizen_science (дата обращения 21.11.2022)

Горелова, Ю.В., Благовидов, А.К. (2022) Народный экологический мониторинг: опыт общественного участия и внедрение в программную работу заповедников и национальных парков, *Экологический мониторинг на особо охраняемых природных территориях. VII Междунар. научно-практ. конф. «Чтения памяти Н.М. Пржевальского»*, Смоленск, Маджента, с.170-175.

Захаров, В.П. (2022) Сетевые технологии в образовательных проектах, *Проблемный и ноосферный подходы к формированию культуры поведения ценностно-ориентированной личности в современном образовании для устойчивого развития цивилизации: Материалы XXI Московской междунар. конф., Москва, 18 марта 2021 года*, М., Спутник+, с. 94-96.

Калякин, М.В., Серегин, А.П. (2022) Гражданская наука: открытия может делать каждый, *Всерос. конф.: IX Общероссийский фестиваль природы «Первозданная Россия»*, электронный ресурс, URL: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/462076601/> (дата обращения: 7.11.2022).

Кириллов, А. (2020) *Цифровые натуралисты*, Интернет-проект eRazvitie.org (27.02.2020), электронный ресурс, URL: http://erazvitie.org/article/naturalisti_i (дата обращения 22.05.2022).

Крюкова, К.А., Данченко, А.М. (2013) Фенологические наблюдения в России: краткая история развития, *Вестник Томского государственного университета*, № 377, с. 192-195.

Телеганова, В.В. (2022) Фенологические наблюдения на ООПТ Калужской области как способ экологического просвещения, *Экологический мониторинг на особо охраняемых природных территориях. VII Международная научно-практическая конференция «Чтения памяти Н. М. Пржевальского»*, Смоленск, Маджента, с. 179-189.

Holder, C.F. (1891) *Charles Darwin: His Life and Work*, New York-London.

Hooker, W. (1879) *Science for the School and Family*, New York.

Seregin, A.P., Bochkov, D.A., Shner, J.V. et al. (2020) "Flora of Russia" on iNaturalist: A dataset, *Biodiversity Data Journal*, vol. 8, p. 59249, doi 10.3897/BDJ.8.e59249.

References

Bakal, L. (2020) *Kak obychnye lyudi pomogayut nauke (i vy tozhe mozhetе). Prosto najdem galaktiku* [How ordinary people help science (and you can too). Let's just find the galaxy], Mel online edition, available at: https://mel.fm/ucheba/fakultativ/7126408-citizen_science (accessed on 21.11.2022).

Gorelova, Yu.V., Blagovidov, A.K. (2022) Narodnyj ekologicheskij monitoring: opyt obshchestvennogo uchastiya i vnedrenie v programmnyuyu rabotu zapovednikov i nacional'nyh parkov [Civil environmental monitoring: public participation experience and implementation into program of state natural reserves and national parks], *Ekologicheskij monitoring na osobo ohranyaemyh prirodnyh territoriyah. VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakt. konf. «Chteniya pamyati N.M. Przheval'skogo»* [Environmental monitoring in specially protected natural areas. VII International Scientific and Practical Conference "Readings in memory of N.M. Przhevalsky"], Magenta, Smolensk, Russia, pp. 170-175.

Zakharov, V.P. (2022) Setevye tekhnologii v obrazovatel'nyh proektah [Network technologies in educational projects], *Problemnyj i noosfernyj podhody k formirovaniyu kul'tury povedeniya, cennostno-orientirovannoj lichnosti v sovremennom obrazovanii dlya ustojchivogo razvitiya civilizacii: Materialy XXI Moskovskoj mezhdunarodnoj konferencii, Moskva, 18 marta 2021 g.* [Network technologies in educational projects, Problematic and noospheric approaches to the

formation of a culture of behavior of a value-oriented personality in modern education for the sustainable development of civilization: Proceedings of the XXI Moscow Intern. conf., Moscow, March 18, 2021], Sputnik+, Moscow, Russia, pp. 94-96.

Kalyakin, M.V., Seregin, A.P. (2022) Grazhdanskaya nauka: otkrytiya mozhet delat' kazhdyj [Civil science: everyone can make discoveries], *Vseros. konf.: IX Obshcherossiyskij festival' prirody «Pervozdannaya Rossiya»* [All-Russian conference: IX All-Russian festival of nature "Pristine Russia"], available at: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/462076601/> (accessed on 7.11.2022).

Kirillov, A. (2020) *Cifrovye naturalisty* [Digital Naturalists], Internet-proekt eRazvitie.org (27.02.2020), available at: http://erazvitie.org/article/naturalisti_i (accessed on 22.05.2022).

Kryukova, K.A., Danchenko, A.M. (2013) Fenologicheskie nablyudeniya v Rossii: kratkaya istoriya razvitiya [Phenological Observations in Russia: Brief History of Development], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 377, pp. 192-195.

Teleganova, V.V. (2022) Fenologicheskie nablyudeniya na OOPT Kaluzhskoj oblasti kak sposob ekologicheskogo prosveshcheniya [The «Kaluga City Pine Forest» Federal Protected Natural Area is a Phenological Site for Specialists and Citizens], *Ekologicheskij monitoring na osobo ohranyaemyh prirodnyh territoriyah. VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakt. konf. «Chteniya pamyati N.M. Przheval'skogo»* [Environmental monitoring in specially protected natural areas. VII International Scientific and Practical Conference "Readings in memory of N.M. Przhevalsky"], Magenta, Smolensk, Russia, pp. 179-189.

Holder, C.F. (1891) *Charles Darwin: His Life and Work*, New York-London.

Hooker, W. (1879) *Science for the School and Family*, New York.

Seregin, A.P., Bochkov, D.A., Shner, J.V. et al. (2020) "Flora of Russia" on iNaturalist: A dataset, *Biodiversity Data Journal*, vol. 8, p. 59249, doi 10.3897/BDJ.8.e59249.

Поступила в редакцию: 23.12.2022.

Доработана после рецензирования: 17.04.2023.

Для цитирования / For citation:

Захаров, В.П. (2023) Как самые обычные люди помогают науке, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 1-2, с. 143-151, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-143-151.

Zakharov, V.P. (2023) How ordinary people help science, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no. 1-2, pp. 143-151, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-143-151.
