

Лаборатория вычислительной экологии: достижения и перспективы

Ханина Л.Г.¹, Иванова Н.В.¹, Шашков М.П.^{1,2}, Смирнов В.Э.^{1,3}, Романов М.С.¹, Шанин В.Н.^{1,4}, Фролов П.В.⁴, Глухова Е.М.¹, Бобровский М.В.^{1,4}

¹*Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*

²*Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля*

³*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

⁴*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ НЦБИ РАН*

khanina.larisa@gmail.com

Кратко описана история лаборатории и даны представления о современных направлениях исследований. Последние включают три раздела: (1) экоинформатика и анализ массивов объединенных данных; (2) модели, количественный анализ и геоинформационные технологии для изучения биоразнообразия и биогеохимических циклов в наземных экосистемах и (3) изучение популяций птиц с помощью математического моделирования и статистического анализа. Для каждого направления приведены основные результаты, отраженные в публикациях. Подчеркнута важная роль внутрисерийского и международного сотрудничества для решения актуальных экологических проблем, как на региональном, так и на глобальном уровнях. Сделан вывод о возможности решения коллективом лаборатории широкого спектра экологических задач путем применения современного аппарата информатики и методов количественного анализа данных.

Ключевые слова: биоразнообразие, экоинформатика, количественный анализ экологических данных, математическое моделирование, геоинформационные технологии.

Laboratory of Computational Ecology: achievements and prospects

Khanina L.G.¹, Ivanova N.V.¹, Shashkov M.P.^{1,2}, Smirnov V.E.^{1,3}, Romanov M.S.¹, Shanin V.N.^{1,4}, Frolov P.V.⁴, Glukhova E.M.¹, Bobrovsky M.V.^{1,4}

¹*Institute of Mathematical Problems of Biology of RAS, M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS*

²*Academician Y.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology*

³*Center for problems of ecology and productivity of forests of RAS*

⁴*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of RAS, PSCBI RAS*

The history of the laboratory and current research directions are briefly described. The latter include three sections: (1) ecoinformatics and analysis of integrated data sets; (2) modelling, quantitative data analysis and geoinformation technologies for studying biodiversity and biogeochemical cycles in terrestrial ecosystems, and (3) studying bird populations using mathematical modelling and statistical analysis. For each area the main results reflected in the publications are given. The important role of intra-Russian and international cooperation in solving urgent environmental problems both regionally and globally is emphasized. The conclusion is made about the possibility of solving a wide range of ecological problems by applying modern methods of informatics and quantitative data analysis by the laboratory team.

Key words: biodiversity, ecoinformatics, quantitative data analysis, mathematical modelling, geoinformation technologies.

1. История

Лаборатория вычислительной экологии была образована по инициативе М.Н. Устинина в 2005 г. из сотрудников сектора прикладной математики, работавших под управлением Эммануила Эльевича Шноля – Ханиной Л.Г., Глуховой Е.М. и Смирнова В.Э. Направление экологической информатики в деятельности института (бывшего НИВЦ АН СССР) возникло в самом конце 1980-х годов благодаря идеям Альберта Макарьевича Молчанова о возможности использования достижений информатики и компьютерного "всеобуча" для решения экологических задач. (Отметим, что разработкой математических вопросов в

экологических исследованиях занималась в те времена в нашем институте лаборатория Александра Дмитриевича Базыкина.) Работа была начата в тесном сотрудничестве с Группой биогеоценотических процессов Института почвоведения и фотосинтеза АН СССР, возглавляемой Александром Сергеевичем Комаровым. Сотрудничество, начатое в те далекие времена, продолжается и поныне – теперь уже с Лабораторией моделирования экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, входящего в состав ФИЦ НЦБИ РАН. Также с начала 1990-х годов возник творческий союз математиков и информатиков с ведущими ботаниками и экологами нашей страны – Ольгой Всеволодовной Смирновой, Людмилой Борисовной Заугольной и Людмилой Алексеевной Жуковой. Главным результатом этого союза было создание электронных баз экологических данных, геоботанических описаний растительности нашей страны и справочных баз данных по видам растений и их группам [1–7]. Плотное сотрудничество нашей лаборатории с Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, а также кафедрой Экологии и географии растений (бывшей кафедрой Геоботаники) Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова продолжается и в настоящее время. Вместе с тем, развиваются и новые связи – с Институтом проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Институтом экологии растений и животных УрО РАН, Институтом биологии Коми НЦ УрО РАН, Югорским государственным университетом, Ботаническим институтом им. В.Л. Комарова РАН, Институтом проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН и др.

2. Современное состояние

В настоящее время в деятельности Лаборатории вычислительной экологии можно выделить три основных направления.

1) Экоинформатика и анализ массивов объединенных данных.

Геоботанические базы данных, разработанные в ИМПБ РАН при участии сотрудников ЦЭПЛ РАН и ИФХиБПП РАН, были переданы в международный архив EVA (более 5000 описаний) [6], где они активно используются в различных проектах [8]. С 2017 г. в деятельности лаборатории появилось новое направление, связанное с представлением данных в международном репозитории GBIF (Global Biodiversity Information Facility) [9]. Нами создана и поддерживается инфраструктура для хранения и публикации национальных данных о биоразнообразии, объединяющая в настоящее время данные более 60-ти российских организаций [10, 11]. Совместно с зарубежными коллегами проанализированы возможности и ограничения основного стандарта GBIF Darwin Core для представления экологических учетов: предложено дополнение спецификации, добавление терминов, разработана новая схема представления данных комплексных учетов почвенных беспозвоночных [12]. В составе международных коллективов выполнена стандартизация и публикация в GBIF объединенного массива данных Летописей природы 55 российских заповедников [13]. Помимо данных о растительности [14, 15 и др.], проведен сбор и анализ данных о биоразнообразии по почвенным беспозвоночным [16–18], жукам [19, 20] и птицам [21]. Нами опубликованы наборы экологических данных также в других тематических международных репозиториях: Zenodo [13], iDiv [16], sPlots [22].

На основе глобальных данных в составе международных коллективов нами выполнен ряд обобщающих работ: уточнена Европейская классификация естественных местообитаний EUNIS [23]; проанализированы тренды изменений сроков наступления и длительности фенологических явлений в связи с глобальными изменениями климата [24, 25]; проведен филогенетический анализ структуры лесной растительности в Европе [26]; проведен анализ факторов, объясняющих распространение европейских растений за пределы Европы [27]; обобщены данные на глобальном уровне о сообществах дождевых червей и построены модели их распространения [16, 28].

2) Модели, количественный анализ и геоинформационные технологии для изучения биоразнообразия и биогеохимических циклов в наземных экосистемах.

В рамках этого направления в последние годы нами проведены следующие основные работы.

Разработана интеграционная схема модели динамики разнообразия лесной растительности BioCalc с моделями роста древостоя FORRUS-S и формирования органического вещества почвы Romul_Hum [29]. Предложен алгоритм расчета разнообразия как функции отклика видовой богатства растительности на изменение значений предикторов, которые рассчитываются в моделях FORRUS-S и Romul_Hum для различных сценариев лесохозяйственных воздействий при разных климатических режимах. Оценки разнообразия могут быть верифицированы на существующих массивах лесотаксационных и геоботанических данных.

Оценена динамика зарастания бывших сельскохозяйственных земель, реконструирована история пожаров и выявлены факторы, значимо влияющие на динамику растительности [30]. Проанализирован вклад валежных стволов и ветровально-почвенных комплексов в изменение биоразнообразия [31, 32]. Проводится исследование структуры древостоев по материалам аэрофотосъемки: апробированы алгоритмы автоматического детектирования деревьев по фотограмметрическим моделям высот и облакам точек в

одновозрастных и малонарушенных лесах [33]; выполнена оценка последствий массового ветровала по данным аэрофотосъемки с квадрокоптера [34].

Традиционно, в лаборатории ведутся работы по количественным методам анализа видового, структурного [31, 32] и функционального [35–37] разнообразия растений и растительных сообществ. В частности, показано, что крупный валеж в широколиственном лесу значительно увеличивает видовое и структурное разнообразие травянистых и древесных видов растений [31]; внутривидовое варьирование признаков по абиотическим градиентам не всегда согласуется с межвидовой изменчивостью растений и варьированием признаков на уровне сообществ [37]; существует унимодальная связь между индексом функциональной дивергенции и надземной биомассой в средних по биомассе участках альпийских сообществ – на пестроовсяницевых лугах [36]; по изотопному составу листьев растений предположена частичная миксотрофность у некоторых альпийских видов семейства Gentianaceae [35].

3) Изучение популяций птиц с помощью математического моделирования и статистического анализа.

В рамках этого направления разработана серия моделей для оценки состояния популяций белоплечего орлана на Дальнем Востоке России: (1) матричная популяционная модель для оценки динамики численности [38, 39]; (2) модель кумулятивных кривых для оценки числа гнездовых территорий; (3) генерализованная линейная обобщенная модель (GLMM) для оценки факторов, влияющих на эффективность воспроизводства орланов [40]; (4) Вейбулловская модель старения для оценки выживаемости особей в неволе и в природе [41]; (5) статистическая модель (основанная на тесте пропорций и рандомизационных методах) непрямого воздействия бурых медведей на эффективность размножения белоплечих орланов [42]. Путем применения методов моделирования показано, что популяции белоплечего орлана на Сахалине и в Хабаровском крае сокращаются вследствие низкой эффективности размножения, в том числе из-за высокого пресса хищничества бурых медведей. Выявлены основные показатели эффективности воспроизводства орланов и факторы, влияющие положительно и отрицательно на эти показатели. Статистические модели используются для оценки состояния популяций и других птиц [43, 44].

3. Заключение

Высокая квалификация и обширный опыт участия в российских и международных исследовательских проектах обеспечивают постановку и решение коллективом лаборатории актуальных экологических задач, как на региональном, так и на глобальном уровнях. С помощью современного аппарата информатики и методов количественного анализа данных возможна разработка научно обоснованных методов и подходов для смягчения последствий изменения климата, сохранения биологического разнообразия, ведения экосистемного и неистощительного природопользования.

Список литературы

1. Комаров А.С., Ханина Л.Г., Зубкова Е.В., Губанов В.С., Фомин В.Г. О компьютерной реализации наиболее трудоемких методов обработки геоботанических описаний. *Биологические науки*. 1991. № 8. С. 45–51.
2. Заугольнова Л.Б., Ханина Л.Г. Опыт разработки и использования баз данных в лесной фитоденологии. *Лесоведение*. 1996. № 1. С. 76–83.
3. Smirnova O., Zaugol'nova L., Khanina L., Braslavskaya T., Glukhova E. FORUS – database on geobotanic relevés of European Russian forests. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Mathematical Biology and Bioinformatics*. Ed. Lakhno V.D. Moscow: MAKS Press, 2006. P. 150–151.
4. *Free DOI Lookup*. URL: <https://www.impb.ru/eco/index.php> (accessed 20.09.2022).
5. Заугольнова Л.Б., Ханина Л.Г., Браславская Т.Ю., Бакун Е.Ю., Глухова Е.М., Бобровский М.В., Шовкун М.М., Смирнова О.В., Луговая Д.Л., Яницкая Т.О. *Лесная растительность Северной Евразии*. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620258 в Реестре баз данных 12 февраля 2014 г.
6. *Free DOI Lookup*. URL: <https://www.givd.info/ID/EU-RU-014> (accessed 20.09.2022).
7. Браславская Т.Ю., Тихонова Е.В., Басова Е.В., Проказина Т.С. Развитие базы данных «Лесная растительность Северной Евразии» в Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. *Вопросы лесной науки*. 2020. Т. 3. № 4. 1–23. doi: [10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-23](https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-23)
8. *Free DOI Lookup*. URL: <http://euroveg.org/eva-database> (accessed 20.09.2022).
9. *Free DOI Lookup*. URL: <https://www.gbif.org> (access 20.09.2022)
10. Ivanova N.V., Shashkov M.P. Biodiversity databases in Russia: towards a national portal. *Arct. Sci.* 2017. V. 3. No. 3. P. 560–576.
11. Ivanova N.V., Shashkov M.P. The possibilities of GBIF data use in ecological research. *Russ. J. Ecol.* 2021. V. 52. No. 1. P. 1–8.

12. Shashkov M., Ivanova N., Wiczorek J. Ecological data in Darwin Core: the case of earthworm surveys. *Biodivers. Data J.* 2021. V. 9. P. e71292.
13. Ovaskainen O., Meyke E., Lo C., ..., Ivanova N., ..., Shashkov M., ..., Kurhinen J. Chronicles of nature calendar, a long-term and large-scale multitaxon database on phenology. *Sci. Data.* 2020. V. 7. P. 47.
14. Shashkov M.P., Bobrovsky M.V., Shanin V.N., Khanina L.G., Grabarnik P.Ya., Stamenov M.N., Ivanova N.V. Data on 30-year stand dynamics in an old-growth broad-leaved forest in the Kaluzhskie Zaseki State Nature Reserve, Russia. *Nat. Conserv. Res.* 2022. V. 7. No. 1. P. 24–37.
15. Shovkun M., Ivanova N., Khanina L., Romanov M.S., Demidov V. Current vegetation data from the Prioksko-Terrasnyi Biosphere Reserve. *Biodivers. Data J.* 2021. V. 9. P. e71266.
16. Phillips H.R.P., Bach E.M., Bartz M.L.C., ..., Shashkov M., ..., Eisenhauer N. Global data on earthworm abundance, biomass, diversity and corresponding environmental properties. *Sci. Data.* 2021. V. 8. P. 136.
17. Kuznetsova N., Ivanova N. Diversity of Collembola under various types of anthropogenic load on ecosystems of European part of Russia. *Biodivers. Data J.* 2020. V. 8. P. e58951.
18. Kuznetsova N., Bokova A., Kuprin A., Potapov M., Shveenkova Y., Ivanova N. The extremely high diversity of Collembola in relict forests of Primorskii Krai of Russia. *Biodivers. Data J.* 2021. V. 9.
19. Shashkov M., Alexeev S., Ivanova N. Communities of ground beetles (Carabidae, Coleoptera) in broad-leaved forests of protected and urban areas of the Kaluga Oblast (European Russia). *Biodivers. Data J.* 2020. V. 8. P. e58688.
20. Aleksanov V., Alekseev S., Shashkov M. Ground beetles (Carabidae) in urban habitats of Kaluga City (Russia). *Biodivers. Data J.* 2022. V. 1. P. e76100.
21. Ukolov I.I., Romanov M.S., Arkhipov V.Yu., Kalyakin M.V., Voltzit O.V. Ru-Birds.RU, bird observations from Russia and neighboring regions: an occurrence dataset. *Biodivers. Data J.* 2021. V. 9. P. e76202.
22. Sabatini F.M., Lenoir J., Hattab T., ..., Khanina L., ..., Bruelheide H. sPlotOpen – An environmentally balanced, open-access, global dataset of vegetation plots. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2021. V. 30. No. 9. P. 1740–1764.
23. Chytrý M., Tichý L., Hennekens S.M., ..., Khanina L., ..., Schaminée J.H.J. EUNIS Habitat Classification: Expert system, characteristic species combinations and distribution maps of European habitats. *Appl. Veg. Sci.* 2020. V. 23. No. 4. P. 648–675.
24. Delgado M., Roslin T., Tikhonov G., ..., Ivanova N., ..., Shashkov M., ..., Ovaskainen O. Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events. *PNAS.* 2020. V. 117. No. 49. P. 31249–31258.
25. Roslin T., Antão L., Hällfors M., ..., Ivanova N., ..., Shashkov M., ..., Ovaskainen O. Phenological shifts of abiotic events, producers and consumers across a continent. *Nat. Clim. Chang.* 2021. V. 11. P. 241–248.
26. Padullés Cubino J.P., Lososová Z., Bonari G., ..., Khanina L., ..., Chytrý M. Phylogenetic structure of European forest vegetation. *J. Biogeogr.* 2021. V. 48. No. 4. P. 903–916.
27. Pouteau R., Thuiller W., Hobohm C., ..., Khanina L., ..., van Kleunen M. Climate and socio-economic factors explain differences between observed and expected naturalization patterns of European plants around the world. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2021. V. 30. No. 7. P. 1514–1531.
28. Phillips H.R.P., Guerra C.A., Bartz M.L.C., ..., Shashkov M., ..., Eisenhauer N. Global distribution of earthworm diversity. *Science.* 2019. V. 366. No. 6464. P. 480–485.
29. Грабарник П.Я., Чертов О.Г., Чумаченко С.И., Шанин В.Н., Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Быховец С.С., Фролов П.В. Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы. *Мат. биол. и биоинф.* 2019. V. 14. № 2. С. 488-499. doi: [10.17537/2019.14.488](https://doi.org/10.17537/2019.14.488)
30. Khanina, L.G., Smirnov, V.E., Romanov, M.S., Bobrovsky, M.V. Effect of spring grass fires on vegetation patterns and soil quality in abandoned agricultural lands at local and landscape scales in Central European Russia. *Ecol. Process.* 2018. V. 7. P. 38.
31. Khanina L.G., Bobrovsky M.V., Zhmaylov I.V. Vegetation diversity on the microsites caused by tree uprooting during a catastrophic windthrow in temperate broadleaved forests. *Rus. J. Ecosyst. Ecol.* 2019. V. 4. No. 3. P. 1.
32. Khanina L.G., Bobrovsky M.V. Value of large *Quercus robur* fallen logs in enhancing the species diversity of vascular plants in an old-growth mesic broad-leaved forest in the Central Russian Upland. *For. Ecol. Manag.* 2021. V. 491. P. 119172.
33. Иванова Н.В., Шашков М.П., Шанин В.Н. Определение характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъёмки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА). *Вестн. Том. гос. ун-та. Биология.* 2021. № 54. С. 158–175.
34. Ivanova N.V., Shashkov M.P. Tree stand assessment before and after windthrow based on open-access biodiversity data and aerial photography. *Nat. Conserv. Res.* 2022. V. 7. No. 1. P. 52–63.
35. Onipchenko V.G., Lavrenov N.G., Tiunov A.V., Makarov M.I., Werger M. J. A., Akhmetzhanova A.A., Elumeeva T.G., Smirnov V.E., Wang Qian, Yan W. Are alpine *Gentianaceae* plants mixotrophic? *Biol. Bull. Rev.* 2021. V. 11. P. 429–437.

36. Dudova K.V., Ataballyev G.G., Akhmetzhanova A.A., Gulov D.M., Dudov S.V., Elumeeva T.G., Kipkeev A.M., Logvinenko O.A., Semenova R.B., Smirnov V.E., Tekeev D.K., Salpagarov M.S., Onipchenko V.G. Functional diversity of alpine plant communities: a case study of plant height. *Biol. Bull. Rev.* 2020. V. 10. P. 464–474.
37. Onipchenko V.G., Rozhin A.O., Smirnov V.E., Akhmetzhanova A.A., Elumeeva T.G., Khubieva O.P., Dudova K.V., Soudzilovskaia N.A., Cornelissen J.H.C. Do patterns of intra-specific variability and community weighted-means of leaf traits correspond? An example from alpine plants. *Bot. Pac.* 2020. V. 9. No. 1. P. 53–62.
38. Романов М.С., Мастеров В.Б. Матричная модель популяции белоплечего орлана *Haliaeetus pelagicus* на Сахалине. *Мат. биол. и биоинф.* 2008. Т. 3. № 2. С. 36-49. doi: [10.17537/2008.3.36](https://doi.org/10.17537/2008.3.36)
39. Romanov M.S., Masterov V.B. Low breeding performance of the Steller's sea eagle (*Haliaeetus pelagicus*) causes the populations to decline. *Ecol. Model.* 2020. V. 420. P. 108877.
40. Masterov V.B., Romanov M.S. Reproduction efficiency of the Steller's Sea Eagle on Sakhalin Island and the Lower Amur (Russia). *Nat. Conserv. Res.* 2022. V. 7. No. 1. P. 1–13.
41. Романов М.С., Мастеров В.Б., Курилович Л.Я. Анализ кривых выживания белоплечего орлана. Стареют ли самцы быстрее самок? *Rus. J. Ecosyst. Ecol.* 2019. Т. 4. № 4. С. 3.
42. Романов М.С., Мастеров В.Б. Непрямое воздействие хищничества бурых медведей на воспроизводство популяции белоплечих орланов. *Rus. J. Ecosyst. Ecol.* 2020. Т. 5 № 4. С. 2.
43. Мечникова С.А., Романов М.С., Калякин В.Н., Кудрявцев Н.В. Кречет на Ямале: Динамика величины выводка и размеров гнезд в период 1973-2008 гг. *Экология.* 2010. № 3. С. 219–226.
44. Wei C., Schweizer M., Tomkovich P.S., Arkhipov V.Yu., Romanov M., Martinez J., Lin X., Halimubieke N., Que P., Mu T., Huang Q., Zhang Z., Székely T., Liu Y. Genome-wide data reveal parphyly in the sand plover complex (*Charadrius mongolus/leschenaultii*). *Ornithology.* 2022. V. 139. P. 1–10.