

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

Денис Сергеевич Гуц

«27» августа 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Диссертация «Изучение генетической адаптации в популяциях
лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) с использованием данных
полногеномного генотипирования» выполнена на кафедре геномики и
биоинформатики.

В период подготовки диссертации соискатель Новикова Серафима
Валерьевна обучалась в аспирантуре Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
«Сибирский федеральный университет» и работала в должности инженера-
исследователя лаборатории лесной геномики Федерального
государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Сибирский федеральный университет», а также в должности
младшего научного сотрудника лаборатории геномных исследований и
биотехнологии Федерального исследовательского центра «Красноярский
научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ
КНЦ СО РАН).

В 2022 году окончила аспирантуру ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет» по направлению подготовки 06.06.01
Биологические науки.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по английскому языку и по философии науки выдана в 2025 году Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Сибирский федеральный университет». Справка о сдаче кандидатского экзамена по генетике выдана в 2025 году Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова Российской академии наук.

Научный руководитель – Крутовский Константин Валерьевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории популяционной генетики им. академика Ю.П. Алтухова Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова Российской академии наук.

На заседании присутствовали: Шишов Владимир Валерьевич, д-р техн. наук; Смирнова Ольга Валентиновна, д-р мед. наук; Степанов Николай Витальевич, д-р биол. наук; Иванова Елена Анатольевна, д-р биол. наук; Ямских Ирина Евгеньевна, д-р биол. наук; Крутовский Константин Валерьевич, канд. биол. наук; Орешкова Наталья Викторовна, канд. биол. наук; Кузьмин Дмитрий Александрович, канд. техн. наук; Трусова Мария Юрьевна, канд. биол. наук; Белокопытова Лилиана Владимировна, канд. биол. наук; Тюменцева Анна Владимировна, канд. биол. наук; Прудникова Светлана Владиславна, д-р биол. наук; Красицкая Василиса Валерьевна, канд. биол. наук; Бондар Евгения Ивановна, канд. биол. наук; Шаров Вадим Витальевич; Рябова Ксения Константиновна; Путилин Илья Романович.

Были заданы следующие вопросы:

1. Почему главные компоненты объединяют мало вариаций?
2. Сколько всего компонент брали для анализа главных компонент?
3. Что в работе понимается под термином «популяция»?
4. Все места отбора были не нарушены, например, пожарами?
5. Где располагались самые северные точки отбора и в какую трансекту они включены?

6. Обсуждается ли в работе, что популяции могут принадлежать к разным видам?
7. Как определено наиболее достоверное число кластеров при работе Admixture?
8. Сколько было разбиений при кросс-валидации?
9. Отбор кернов и расчет дендрофенотипов проводился для генотипированных деревьев?
10. В течение какого периода времени собиралась хвоя?
11. Как быстро после сбора выделялась ДНК?
12. Почему для уменьшения размерности выбрали PCA, а не tSNE или UMAP? Есть ли в русском языке аналоги термину «снип»?
13. Уместно ли использование термина «картирование» для обозначения процедуры выравнивания прочтений на референсный геном?
14. Каков был личный вклад автора на каждом из этапов работы?

На все вопросы соискатель дал исчерпывающие ответы.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность исследования

Климатические модели прогнозируют увеличение продолжительности и интенсивности засушливых периодов. В условиях изменяющегося климата в лесных экосистемах наблюдаются изменения в распределении границ лесов: верхняя граница высокогорных лесов смещается вверх, а северная граница леса расширяется в сторону более северных широт. Для изучения процессов, происходящих в таких экосистемах, особое внимание следует уделить хвойным, так как они играют ключевую роль в структуре бореальных лесов.

Одним из эдификаторов бореальных лесов Сибири является лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). Она обладает обширным ареалом с широким диапазоном климатических условий и экологической неоднородностью, что дает основание для выделения климатипов и

географических рас вида, отчасти определяемых широтой произрастания. Высота произрастания, из-за влияния неблагоприятных факторов, которые действуют как основные силы в отборе наиболее приспособленных генотипов и стимулируют локальную адаптацию и дифференциацию, также приводит к разделению *L. sibirica* еще и по высотным экотипам.

Методы секвенирования с сокращенной представленностью генома (Reduced Representation Sequencing, RRS) широко используются в популяционной генетике благодаря своей эффективности и доступности. Секвенирование участков, ассоциированных с сайтами рестрикции (Restriction-site Associated DNA sequencing, RADseq), позволяет получить данные о тысячах молекулярно-генетических маркеров – однонуклеотидных полиморфизмов (single nucleotide polymorphism, SNPs) у большого числа особей, не ресеквенируя весь геном. Совместное использование данных генотипирования популяций из контрастных условий произрастания с биоклиматическими показателями позволяет провести поиск генетических основ адаптации и связать генетическую изменчивость с изменчивостью конкретных адаптивных дендрофенотипов – характеристик дерева, основанных на годичных кольцах прироста древесины.

Цель работы

Цель работы – поиск генетических основ адаптации популяций лиственницы сибирской к различным средовым факторам в контрастных экологических условиях с использованием биоклиматических и дендрофенотипических характеристик.

Научная новизна исследования

Впервые пространственно-генетическая структура популяций *L. sibirica* была оценена с помощью данных полногеномного генотипирования методом ddRADseq. Была продемонстрирована пригодность данного метода для изучения мегагеномов хвойных. Полученный набор данных секвенирования для 488 деревьев из 37 точек

сбора в дальнейшем может использоваться для различных исследовательских целей, таких как мониторинг генетического разнообразия, изучение динамики структуры популяций, выявления гибридизации и интрогрессии, изучения адаптации и отбора.

Впервые выявлены маркеры и участки генома *L. sibirica*, изменчивость которых статистически достоверно связана с экологическими градиентами, ассоциированными как с высотой произрастания, так и с широтностью. На основании большого количества генетических маркеров показано наличие корреляции между генотипической изменчивостью дерева и характером его индивидуального ответа на засуху, определяемого на основании дендрохронологических индексов.

Выявлена взаимосвязь уровня индивидуальной гетерозиготности со стабильностью прироста древесины у лиственницы сибирской, что позволяет рассматривать индивидуальную гетерозиготность как потенциальный показатель приспособленности особей в условиях засушливого и нестабильного климата.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты работы позволят глубже понять генетические механизмы, лежащие в основе адаптации *L. sibirica* к различным климатическим условиям. Данное исследование дало возможность выявить гены, потенциально участвующие в локальной адаптации. Обнаруженные SNP с выраженной адаптивной изменчивостью после функциональной проверки могут стать перспективными генетическими маркерами для разработки SNP-чипов с целью отслеживания адаптивной генетической изменчивости в популяциях лиственницы, выявления популяций с высоким генетическим потенциалом и осуществления экологического мониторинга. Предложенный подход, объединяющий генетические и дендрофенотипические данные, может лечь в основу научно обоснованного управления природными ресурсами, а также для установления географического происхождения

древесины в рамках противодействия незаконным рубкам и обороту посадочного материала.

Положения, выносимые на защиту

1. Изученные популяции *L. sibirica* из контрастных частей ареала демонстрируют разделение на уральскую, алтайскую и сибирскую группы. Частоты генотипов коррелируют с географическим положением и условиями окружающей среды, что указывает на наличие пространственной и экологической изоляции, связанной с широтно-долготной дифференциацией и адаптацией к высотным условиям.

2. Участки генома *L. sibirica* содержат однонуклеотидные полиморфизмы, изменчивость которых статистически достоверно связана с экологическими градиентами, и однонуклеотидные полиморфизмы, изменчивость которых ассоциирована с характером индивидуального ответа дерева на засуху.

3. Уровень индивидуальной гетерозиготности в популяциях *L. sibirica* достоверно коррелирует со стабильностью прироста древесины, что позволяет рассматривать индивидуальную гетерозиготность как потенциальный показатель приспособленности особей к условиям засушливого и нестабильного климата.

Личный вклад автора в проведенные исследования

Постановка цели и задач, выбор методов, анализ и обсуждение результатов исследования, и написание статей были проведены совместно с научным руководителем Крутовским К.В.

Автором работы выполнены частично или при участии коллег, отмеченных в разделе благодарности: полевые выезды и сбор образцов хвои, выделение ДНК и подготовка ddRAD библиотек для последующего секвенирования. Сбор кернов, дендрохронологический анализ и расчет индивидуальных дендрофенотипов были организованы сотрудниками лаборатории дендрэкологии и экологического мониторинга Хакасского

технического института, филиала СФУ. Секвенирование образцов осуществлялось сторонней компанией на коммерческой основе. Первичная обработка «сырых» данных секвенирования, их очистка, демультиплексинг и выравнивание на геном проводилось сотрудниками лаборатории геномных исследований и биотехнологии ФИЦ КНЦ СО РАН.

В ходе исследования автором лично проведены: генотипирование секвенированных образцов, вычисление популяционно-генетических параметров, корреляционный и ассоциативный анализ геномных, географических, биоклиматических и дендрохронологических показателей, а также аннотирование полученных наборов SNP.

Достоверность результатов обеспечивается использованием адекватных современных молекулярно-генетических и биоинформатических методов работы; обсуждением основных положений работы на научных всероссийских и международных конференциях. Результаты исследования в полном объеме были изложены в статьях в специализированных международных журналах, содержащихся в перечне Высшей Аттестационной Комиссии Российской Федерации и индексирующихся базами Web of Science и Scopus, что обеспечивает критическое рассмотрение и рецензирование публикуемых работ научной общественностью. Сформулированные в диссертации положения, выводы и заключения отражают большой объем проделанной диссертантом работы.

Апробация работы

Промежуточные и итоговые результаты работы представлены на международных и всероссийских научных конференциях: Международная конференция «Лесные экосистемы бореальной зоны: биосферная роль, биоразнообразие, экологические риски» (г. Красноярск, 16–20 сентября 2024 г.), Всероссийская научная конференция с международным участием «Продуктивность лесов в условиях меняющегося климата», посвященная 100-летию со дня рождения Н. И. Казиминова, и 8-е Международное совещание «Сохранение и рациональное использование лесных генетических

ресурсов» (г. Петрозаводск, 2–7 сентября 2024 г.), Международный Конгресс "VIII Съезд Вавиловского общества генетиков и селекционеров, посвященный 300-летию российской науки и высшей школы" (г. Саратов, 14–19 июня 2024 г.), VII Международная научная конференция «Генетика, геномика, биоинформатика и биотехнология растений» PLANTGEN 2023 (г. Казань, 10–15 июля 2023 г.) VI Всероссийская научная конференция с международным участием «Устойчивость растений и микроорганизмов к неблагоприятным факторам среды» (Иркутск, пос. Большое Голоустное 3–7 июля 2023 г.), Научная конференция с международным участием, посвященная 50-летию юбилею лаборатории популяционной генетики им. Ю. П. Алтухова ИОГен РАН и 85-летию со дня рождения академика Юрия Петровича Алтухова «Генетические процессы в популяциях» (Москва, 11–14 октября 2022 г.), 6-я Международная конференция-совещание «Сохранение лесных генетических ресурсов» (г. Щучинск, Казахстан, 16-20 сентября 2019 г.).

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Результаты исследований Новиковой С.В. изложены в 4 статьях, опубликованных в международных и отечественных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, в том числе 3 в журналах, индексируемых в базе WoS и Scopus, а также 8 научных работ, опубликованных в сборниках материалов российских и международных конференций.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и в изданиях, индексируемых в базе Web of Science:

1. **Novikova, S.V.** Study of the Genetic Mechanisms of Siberian Stone Pine (*Pinus sibirica* Du Tour) Adaptation to the Climatic and Pest Outbreak Stresses Using Dendrogenomic Approach / S.V. Novikova, N.V. Oreshkova, V.V. Sharov, D.A. Kuzmin, D.A. Demidko, E.M. Bisirova, D.F. Zhirmova, L.V.

Belokopytova, E.A. Babushkina, K.V. Krutovsky // Int. J. Mol. Sci. – 2024. – Vol. 25, № 21. – P. 11767.

2. **Novikova, S.V.** Study of the Genetic Adaptation Mechanisms of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) Regarding Climatic Stresses Based on Dendrogenomic Analysis / S.V. Novikova, N.V. Oreshkova, V.V. Sharov, D.F. Zhirnova, L.V. Belokopytova, E.A. Babushkina, K.V. Krutovsky // Forests. – 2023. – Vol. 14, № 12. – P. 2358.

3. **Новикова, С.В.** Генетическая структура и географическая дифференциация популяций лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) на основе генотипирования генома путем секвенирования / С.В. Новикова, Н.В. Орешкова, В.В. Шаров, В.Л. Семериков, К.В. Крутовский // Сибирский экологический журнал. – 2023. – Т. 30, № 5. – С. 675-691. (Novikova, S.V. Genetic Structure and Geographical Differentiation of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) Populations Based on Genome Genotyping by Sequencing / S.V. Novikova, N.V. Oreshkova, V.V. Sharov, V.L. Semerikov, K.V. Krutovsky // Contemp. Probl. Ecol. – 2023. – Vol. 16. – P. 631-644)

4. **Novikova, S.V.** Genetic Adaptation of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) to High Altitudes / S.V. Novikova, V.V. Sharov, N.V. Oreshkova, E.P. Simonov, K.V. Krutovsky // Int. J. Mol. Sci. – 2023. – Vol. 24, №5. – P. 4530.

Прочие публикации:

1. Krutovsky, K.V. Postgenomic technologies in practical forestry: development of genome-wide markers for timber origin identification and other applications/ K.V. Krutovsky, V.S. Akulova, V.I. Belkov, V.V. Birukov, E.I. Bondar, S.I. Feranchuk, Yu.M. Konstantinov, D.A. Kuzmin, **S.V. Novikova**, N.V. Oreshkova, Y.A. Putintseva, M.G. Sadovsky, V.V. Sharov, N.V. Shmakov, E.P. Simonov // Conservation of forest genetic resources. Proceedings of the 6-th international conference, Shchuchinsk, 16-20 September 2019. – 2019. P. 15-17.

2. **Новикова, С.В.** Изучение генетической адаптации в популяциях лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) с использованием данных полногеномного генотипирования / С.В. Новикова, В.В. Шаров, Н.В.

Орешкова, Е.П. Симонов, К.В. Крутовский // Материалы научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию юбилею лаборатории популяционной генетики им. Ю. П. Алтухова ИОГен РАН и 85-летию со дня рождения академика Юрия Петровича Алтухова «Генетические процессы в популяциях», Москва, 11-14 октября 2022 г. – 2022. – С. 79.

3. **Новикова, С.В.** Генетическая адаптация популяций лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) к гетерогенной среде / С.В. Новикова, Н.В. Орешкова, В.В. Шаров, В.Л. Семериков, К.В. Крутовский. // Тезисы докладов VI Всероссийской научной конференции с международным участием. Иркутск, 3–7 июля 2023 г. – 2023. – С. 102.

4. **Novikova, S.V.** Study of the genetic mechanisms of adaptation of Siberian larch based on dendrogenomic analysis / S.V. Novikova, N.V. Oreshkova, V.V. Sharov, D.F. Zhirnova, L.V. Belokopytova, E.A. Babushkina, K.V. Krutovsky // Plant Genetics, Genomics, Bioinformatics, and Biotechnology (PlantGen2023): The 7th International Scientific Conference, Kazan, June 10–15, 2023. – 2023. – P. 472.

5. Krutovsky, K.V. Dendrogenomics is a new interdisciplinary approach to study genetic mechanisms of adaptation and individual tree response to biotic and abiotic stresses: Siberian larch and Siberian stone pine cases / K.V. Krutovsky, **S.V. Novikova**, V.V. Sharov, N.V. Oreshkova, D.F. Zhirnova, L.V. Belokopytova // Abstracts of INTERNATIONAL CONGRESS “VIII Congress of the Vavilov Society of Geneticists and Breeders, dedicated to the 300th anniversary of Russian science and higher education” Saratov, June 14–19, 2024. 2024. – P. 316.

6. Krutovsky, K.V. Study of the genetic mechanisms of adaptation of Siberian larch and Siberian pine to biotic and abiotic stresses using dendrogenomics / K.V. Krutovsky, **S.V. Novikova**, V.V. Sharov, N.V. Oreshkova, D.F. Zhirnova, L.V. Belokopytova // Всероссийская научная конференция с международным участием «Продуктивность лесов в условиях меняющегося климата», Петрозаводск, 2–7 сентября 2024 г., 2024. – С. 154.

7. Крутовский, К.В. Дендрогеномика – современный междисциплинарный подход в изучении адаптивного генетического потенциала популяций лесных деревьев / К.В. Крутовский, **С.В. Новикова**,

В.В. Шаров, Н.В. Орешкова, Д.Ф. Жирнова, Л.В. Белокопытова, Е.А. Бабушкина, Д.А. Демидко, Е.М. Бисирова, Е.А. Ваганов // Материалы международной конференции «Лесные экосистемы бореальной зоны: биосферная роль, биоразнообразие, экологические риски». Красноярск, 16–20 сентября 2024. – 2024. – С. 202.

8. **Новикова, С.В.** Изучение генетических механизмов адаптации к стрессовым факторам у сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) с использованием дендрогеномного подхода и полногеномного генотипирования / С.В. Новикова, Н.В. Орешкова, В.В. Шаров, Д.Ф. Жирнова, Л.В. Белокопытова, Е.А. Бабушкина, Д.А. Демидко, К.В. Крутовский. // Материалы международной конференции «Лесные экосистемы бореальной зоны: биосферная роль, биоразнообразие, экологические риски». Красноярск, 16–20 сентября 2024. – 2024. – С. 285.

Соответствие диссертации паспорту специальности 1.5.7 Генетика

Диссертационная работа соответствует критериям, предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук. Содержание диссертационной работы соответствует областям исследования «Популяционная генетика. Генетическая структура популяций. Симбиогенетика.», «Естественный и искусственный отбор, видообразование, генетические механизмы эволюции. Экологическая генетика. Поддержание генетического биоразнообразия и биобанки.», «Генетические основы селекции. Генетика количественных признаков. Гибридизация. Гетерозис. Инбридинг.» согласно паспорту специальности 1.5.7 Генетика Биологические науки (п.20, п.21. и п. 22 паспорта научной специальности).

Заключение: Диссертация «Изучение генетической адаптации в популяциях лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) с использованием данных полногеномного генотипирования» Новиковой Серафимы Валерьевны рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.7 – Генетика (Биологические науки).

Заключение принято на расширенном заседании кафедры геномики и биоинформатики.

Присутствовало на заседании 17 чел., из них с правом решающего голоса – 14 чел. Результаты голосования: «за» — 14 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел., протокол № 11 от 25 июня 2025 г.



Ямских Ирина Евгеньевна
д-р биол. наук, профессор,
заведующая кафедрой геномики и
биоинформатики



ФГАОУ ВО СФУ	
Подпись <u>И.Е. Ямских</u>	заверяю
Делопроизводитель <u>Т.А. Шершова</u>	
« <u>27</u> » <u>августа</u>	20 <u> </u> г.