

УДК 574*23+574*24

НАКОПЛЕНИЕ ДЕГИДРИНОВ В ХВОЕ СОСНЫ СИБИРСКОЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОТНОЙ ПОЯСНОСТИ ЗАПАДНОГО САЯНА

И. Г. Гетте¹, Н. В. Пахарькова¹, Н. Е. Коротаева²

¹ Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79/10

² Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132

E-mail: igette@sfu-kras.ru, npakharkova@sfu-kras.ru, knev73@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.02.2025 г.

Принята к публикации 11.04.2025 г.

Происходящее в настоящее время изменение климата оказывает существенное влияние на функционирование лесных экосистем. Для горных районов характерно заселение подростом новых территорий. В наблюдаемых условиях весьма актуальной задачей стало изучение механизмов адаптации доминирующих древесных растений. Объектом исследования выбраны деревья сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) второго класса возраста, произрастающие в условиях высотной поясности Западного Саяна. К важным биохимическим факторам устойчивости к стрессам, сопряженные с потерей влаги, относят синтез гидрофильных белков. Впервые для данного вида исследованы особенности накопления стрессовых белков-дегидринов (dhn) в хвое в период перехода в состояние зимнего покоя в условиях высотной поясности. В ходе исследования выявлено, что для открытых местообитаний сосны сибирской, произрастающих выше границы леса, характерно достоверное увеличение в накоплении dhn 65 кДа в хвое. На исследуемых участках фиксируются значимые различия в накоплении стрессового белка у отдельных деревьев. Выделены наиболее устойчивые к климатогенному стрессу деревья как наиболее перспективные для сбора семян и воспроизводства лесов в условиях изменения климата. Полученные результаты позволяют предположить возможность использования определения dhn в хвое в совокупности с другими параметрами для разработки комплексного подхода по выявлению устойчивых и продуктивных деревьев.

Ключевые слова: *Pinus sibirica* Du Tour, белки-дегидрины, зимний покой.

DOI: 10.15372/SJFS20250303

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное изменение климата — одна из важнейших экологических проблем общемирового масштаба. Многими исследователями отмечается, что оно приводит к различным последствиям, в том числе и на территории Сибири (Aitken et al., 2008; Tchebakova et al., 2011; Алексеев и др., 2013; Прожерина, Наквасина, 2021; Rosbakh et al., 2021), где происходят увеличение частоты и продолжительности засушливых периодов летом и уменьшение высоты снежного покрова зимой. Здесь также отмечается движение широтной (в направлении с юга на север)

и высотной (от более низких к более высоким территориям) границ лесных экосистем (Harsch et al., 2009; Tchebakova et al., 2011; Петров и др., 2015; Petrov et al., 2015; Сергиенко, 2015; Kharuk et al., 2021).

В некоторых работах (Kharuk et al., 2021, 2024; Петров и др., 2021; Petrov et al., 2021) отмечается, что повышение температуры атмосферы приводит к продвижению границы леса в условиях высотной поясности Восточного Саяна, то же указано и для Западного Саяна (Kharuk et al., 2010). Для данных территорий одна из основных лесобразовательных пород — сосна сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour). В усло-

виях высокогорья древесные организмы подвержены экстремальным абиотическим факторам, которые, несомненно, оказывают прямое влияние на рост, продуктивность и выживаемость подроста.

Способность подроста сосны сибирской продвигаться выше границы леса обусловлена механизмами адаптации вида (Пахарькова и др., 2024б). Экофизиологические признаки деревьев сосны сибирской, определяющих их возможность выживать в суровых условиях горных экосистем, исследованы недостаточно (Tchebakova et al., 2022; Пахарькова и др., 2024б). С практической точки зрения необходимо уделять большее внимание поиску внутривидовых различий для выявления высокопродуктивных и устойчивых экземпляров и индикаторных признаков, которые могут быть потенциально применимы в селекции для последующего лесовосстановления.

Устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды у растений определяется способностью поддерживать физиологические процессы за счет различных механизмов адаптации, в том числе внутриклеточным действием белков стресса. По многочисленным данным, особое место отводится белкам-дегидринам, накопление которых увеличивается в ответ на обезвоживание (Velasco-Conde et al., 2012; Riyazuddin et al., 2022), действие пониженных температур (Yakovlev et al., 2008; Kosová et al., 2014; Азаркович, 2020) и замораживание (Welling et al., 2004), при солевом стрессе (Colmer et al., 2006; Азаркович, 2020; Azarkovich, 2020).

За последние десятилетия проведено немало исследований по обнаружению дегидринов различных молекулярных масс в ответ на стрессовые факторы в травянистых и древесных растениях (Velasco-Conde et al., 2012), при этом продемонстрировано их накопление в листьях, стеблях, в пыльце и семенах (Kosová et al., 2014; Татаринова и др., 2020; Коротаева и др., 2020; Азаркович, 2020; Azarkovich, 2020). Однако стрессовые белки-дегидрины голосеменных изучены гораздо меньше, чем у покрытосеменных (Татаринова и др., 2023; Tatarinova et al., 2023).

Различные формы дегидринов присутствуют в вегетативных органах голосеменных растений с некоторыми количественными изменениями в годовом цикле (Korotaeva et al., 2015; Sena et al., 2018). Стабильно высокий уровень этих белков отмечается на протяжении всего периода низких отрицательных температур в осенний период и при повышении температуры в весен-

ный период. Это один из ключевых элементов устойчивости к дегидратации. При этом исследования о внутривидовом различии в накоплении стрессовых белков-дегидринов хвойными растениями единичны (Коротаева и др., 2023).

В Западном Саяне зима – продолжительная и холодная (Природный парк..., 2025), поэтому успешность роста и развития сосны сибирской во многом зависит от способности растений переходить в состояние зимнего покоя и его продолжительности (Пахарькова и др., 2024а). В этой связи представляется важным изучить накопление дегидринов, которые известны также как факторы и маркеры зимней холодовой акклимации у хвойных растений (Vuosku et al., 2022).

Целью данной работы стало изучение накопления белков-дегидринов в хвое деревьев сосны сибирской в условиях высотной поясности (на примере хребта Ергаки Западного Саяна) в период перехода в состояние зимнего покоя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В окрестностях оз. Ойское на территории природного парка «Ергаки» (52°50' с. ш., 93°16' в. д.) была заложена трансекта, пересекающая три пробные площади (пп) (рис. 1).

На первой пробной площади (пп 1) древесная растительность представлена стланиковыми формами сосны сибирской. На пп 2 древесная растительность представлена редколесьем с преобладанием сосны сибирской. Сомкнутость крон 0.1. На пп 3 древесная растительность представлена смешанным пихтово-кедровым лесом с преобладанием сосны сибирской. Сомкнутость крон 0.4. Класс возраста древостоя на всех участках – второй.

На каждой пробной площади были выбраны и промаркированы по 20 типичных экземпляров деревьев сосны сибирской, по которым были проведены комплексные исследования экофизиологических показателей (Пахарькова и др., 2024а) (рис. 2).

Среди них на каждой пробной площади было выделено по 4 дерева (2 с минимальной и 2 с максимальной массой хвои), представляющие наибольший интерес для дальнейших исследований по оценке биохимического индикатора стрессового состояния – белков-дегидринов. Далее при описании исследований будут использованы их постоянные номера: деревья 4, 9, 19, 20 – на верхней пробной площади (пп 1),

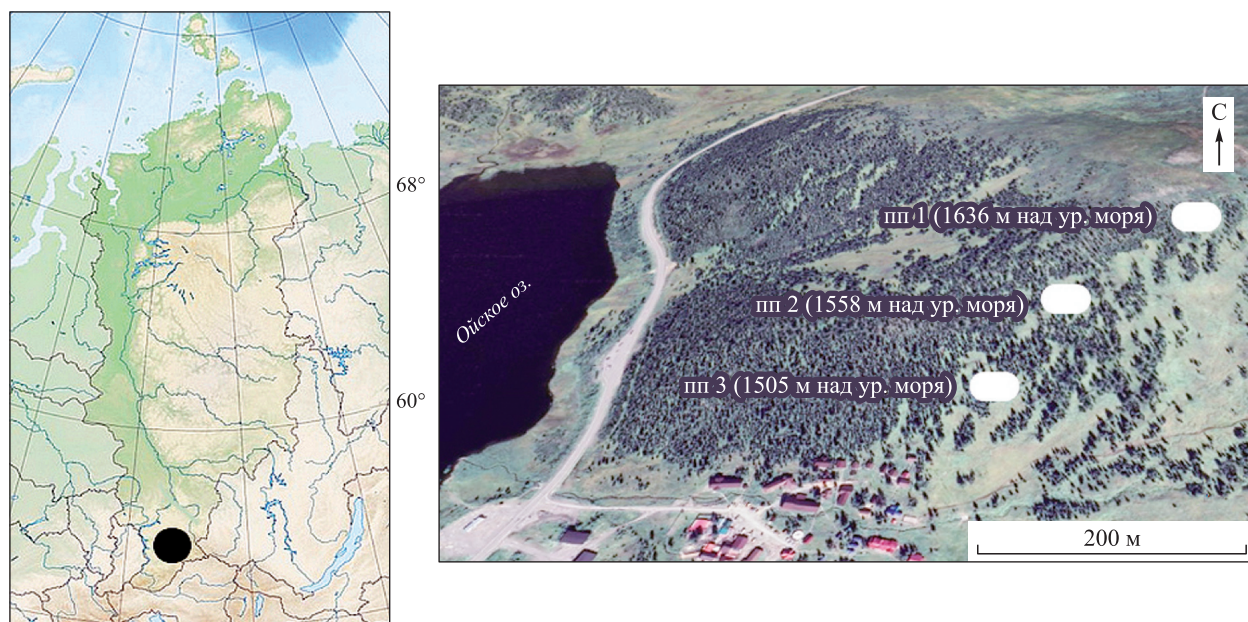


Рис. 1. Расположение пробных площадей на исследуемой территории.

деревья 26, 27, 30, 33 – на пробной площади, расположенной в середине склона (пп 2) и деревья 43, 44, 46, 60 – на нижней пробной площади (пп 3).

Территория исследований, характеризуется континентальным климатом. Климатические условия очень неоднородны, что определяется высотной поясностью гор. Среднегодовая температура по району составляет -3.9°C . После каждых 100 м подъема вверх по склону температура понижается на 0.6°C (Природный парк..., 2025).

По данным метеостанции «Оленья речка» ($52^{\circ}48'$ с. ш., $93^{\circ}14'$ в. д., 1404 м н. у. м.), средняя температура ноября составила -10°C , средний

уровень осадков – 106 мм, в предшествующий сбору месяц (октябрь) – соответственно -2°C и 121 мм (Погода..., 2025).

Сбор растительных образцов проводили в ноябре 2023 г. Исследовалась хвоя 2-го года жизни, которую отбирали в средней части кроны (с разных сторон ствола) в равных пропорциях. Для анализа использовалась объединенная проба для каждого дерева минимум в трех биологических повторностях.

Общий белок выделяли по ранее опубликованной методике (Korotaeva et al., 2012). Его концентрацию определяли с помощью реактива Брэдфорда (Bio-Rad, США). Для электрофоретического разделения наносили по 30 мкг белка

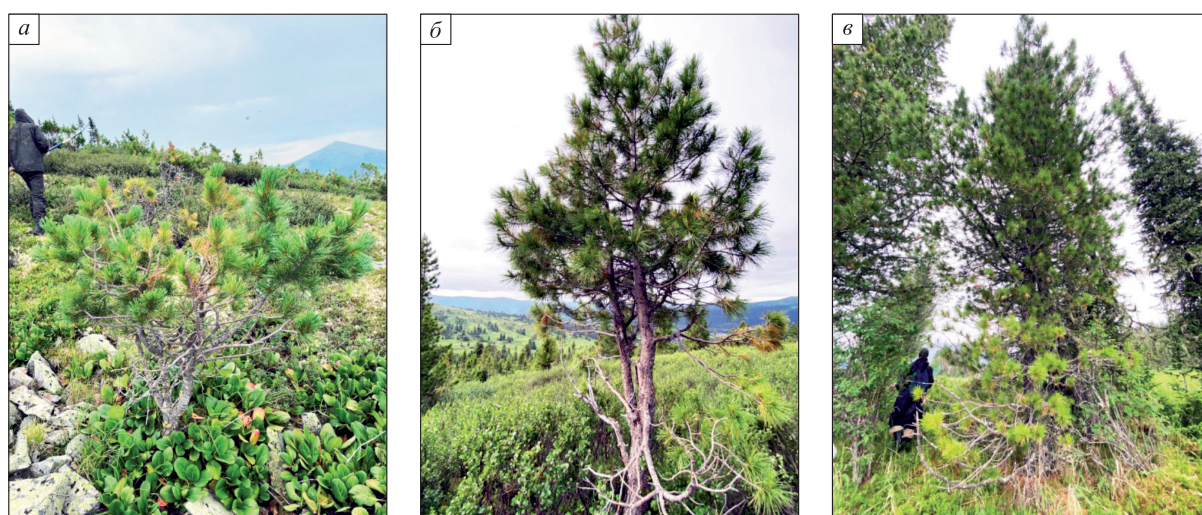


Рис. 2. Внешний вид модельный деревьев на пп 1 (а), пп 2 (б) и пп 3 (в).

на трек. Нанесение белка нормализовали по окраске Кумасси. После разделения белков с помощью Na-ДДС-электрофореза в 12%-м ПААГ и WesternBlot в системе mini-Protean III (BioRad, США) проводили инкубирование полученных нитроцеллюлозных мембран в растворе антител первичных (Enzo Life Sciences, ADI-PLA-100-D; разведение 1 : 500) и вторичных, конъюгированных со щелочной фосфатазой (Enzo Life Sciences, ADI-SUB-301-J; разведение 1 : 1000), в присутствии BCIP и NBT (Gerbu, Германия). Интенсивность окрашивания белкового пятна на мембране определяли денситометрически после сканирования в цифровой формат с помощью сканера Gel Doc™ XR+ (BioRad, США) и программы Image Lab (версия 5.2) (BioRad, США).

При определении сухой массы хвою высушивали в сушильном шкафу при температуре 95 °С, взвешивание до постоянной массы проводили на аналитических весах ГОСМЕТР ВЛ-124В-С с погрешностью ± 0.5 мг. Потери воды рассчитывали в процентном соотношении от массы 100 хвоинок с каждого дерева в трех повторностях.

Статистический анализ данных проводили с помощью программного обеспечения SigmaPlot 12.5. Нормальность данных оценивали с помощью теста Шапиро – Уилка. В случае успешного прохождения теста на нормальность для оценки значимости различий применяли *t*-критерий Стьюдента. В случае, если распределение данных отличалось от нормального, применяли непараметрический тест Манна – Уитни. На графиках строчные буквы обозначают значимые различия при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Успешность онтогенеза дерева часто оценивают по его продуктивности, в том числе по наращиванию биомассы хвои (Усольцев, 2017; Юзбеков, 2022; Пахарькова и др., 2024б).

На рис. 3 представлены данные по сухой массе 100 хвоинок.

Наиболее успешными по продуктивности фотосинтезирующей массы на верхней пробной площади (пп 1) являются деревья под номерами 4, 9 и 20, на пп 2 – 30 и 33, на пп 3 – 44 и 60. Как видно, на всех пп фиксируются значимые межиндивидуальные различия по этому показателю. Можно отметить несколько большее варьирование массы 100 хвоинок на пп 2 и пп 3 по сравнению с пп 1. Вероятно, это связано с более слабым давлением действующих стресс-факторов, что приводит к многообразию морфологических параметров побегов деревьев на пп 2 и пп 3. Более жесткие условия (резкие перепады температуры и влажности, сильные ветра, маломощные почвы) на верхней пробной площади приводят к выживанию на пп 1 наиболее приспособленных экземпляров сосны сибирской.

Важным звеном в защитных реакциях растений в условиях таких стрессовых факторов, как засуха и низкие температуры, служит синтез гидрофильных белков. Накопление белков дегидринов способствует приобретению устойчивости к стрессам, сопряженным с потерей влаги: охлаждению, замораживанию, засухе. Белки дегидринов известны как биохимические факторы сезонной холодовой акклимации (Velasco-Conde

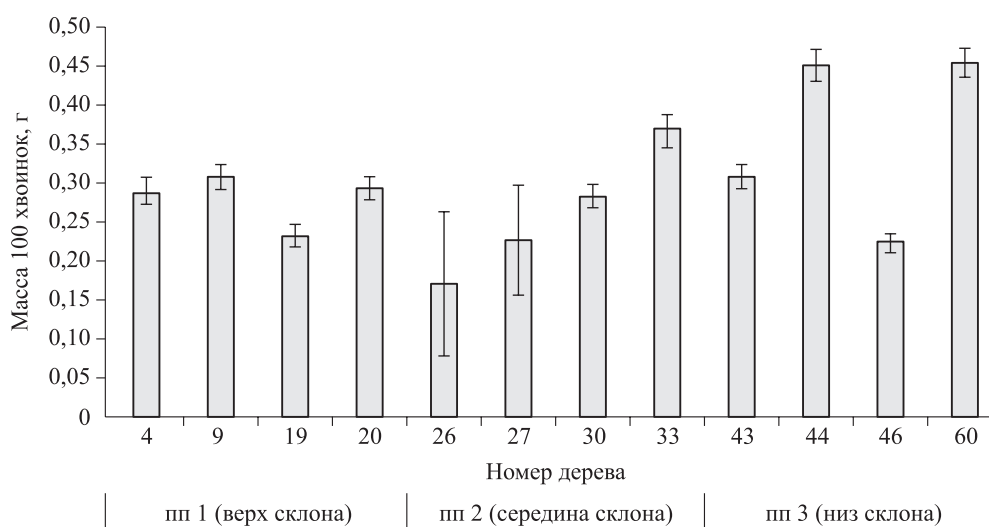


Рис. 3. Масса сухой хвои сосны сибирской.

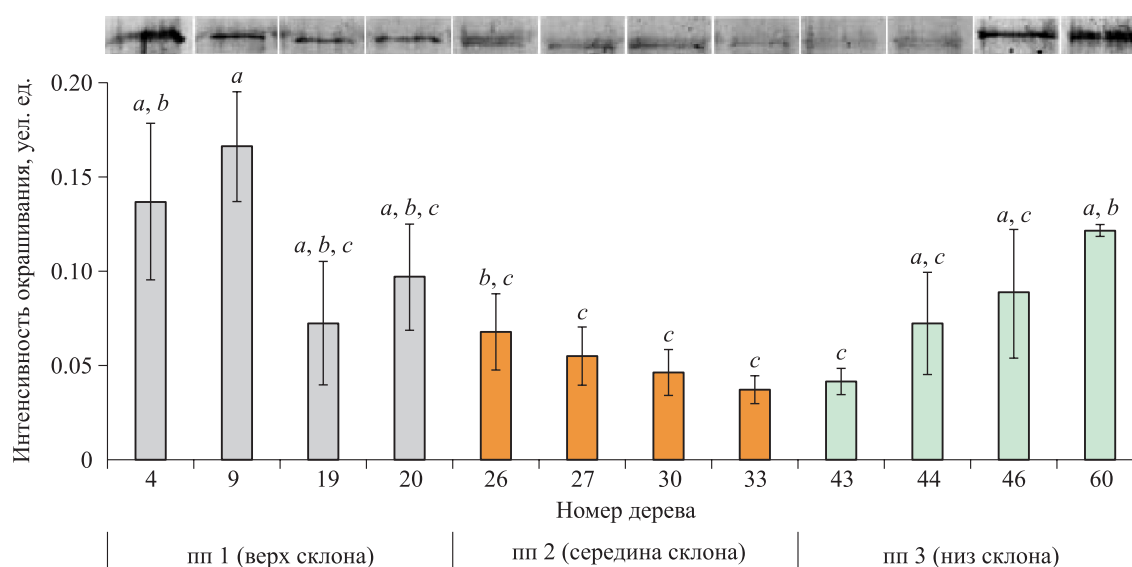


Рис. 4. Содержание белка dhn 65 кДа в хвое модельных деревьев сосны сибирской.

a, b, c – значимые различия при $p < 0.05$. В верхней части рисунка показано изображение типичной мембраны.

et al., 2012; Коротаева и др., 2020; Татарникова и др., 2020).

На рис. 4 представлены данные по накоплению дегидринов с молекулярной массой 65 кДа в хвое деревьев сосны сибирской, произрастающих на пробных площадях вдоль высотного градиента.

Мажорные дегидрины с высокой молекулярной массой, накопление которых связано с сезонной акклимацией в естественных условиях (Korotaeva, 2012; Коротаева и др., 2020) или при действии стресса в рамках модельного эксперимента (Kartashov et al., 2021), ранее были обнаружены для нескольких видов хвойных деревьев. Масса таких дегидринов зачастую близка к 70 кДа, а их содержание в естественных условиях, как правило, имеет сезонную регуляцию (Korotaeva, 2012). Обнаруженный в данном исследовании дегидрин с массой 65 кДа, возможно, относится к этой группе белков.

В осенние месяцы при понижении среднесуточной температуры растительные организмы переходят в состояние зимнего покоя, для чего им необходим синтез метаболитов, функции которых направлены на предотвращение дегидратации клеток, поэтому накопление дегидринов в хвое сосны сибирской в осенний период – закономерное явление. Одним из свойств дегидринов является предотвращение повреждений мембран и белков, к которым может привести снижение содержания воды в клетке (Aziz et al., 2021).

По средним значениям для пробных площадей выявлено, что для открытых местообитаний

сосны сибирской (пп 1) характерно достоверное увеличение в накоплении dhn 65 кДа в хвое по сравнению с пп 2 и пп 3. Растительные организмы горных экосистем обычно акклиматизируются к высокой инсоляции и экстремальным температурам (Larcher et al., 2010; Singh, 2018; Neuner et al., 2020), именно эти факторы выступают стрессовыми условиями, которые в первую очередь определяют положение границы леса. При этом для фотосинтезирующих органов такое сочетание факторов зачастую приводит к несоответствию между интенсивностью световой и темновой фаз фотосинтеза, результатом чего становится накопление активных форм кислорода (АФК) и появление необходимости бороться с последствиями окислительного стресса (Scheller, Haldrup, 2005). Вероятно, эти причины, помимо дегидратации, могли способствовать усиленному накоплению dhn 65 кДа в хвое деревьев пп 1, поскольку дегидрины также способны быть ловушками для АФК и снижать интенсивность внутриклеточного окисления (Aziz et al., 2021). Проведенные нами ранее исследования показали, что существуют значительные межвидовые и межпопуляционные различия по отношению к температурному режиму и условиям увлажнения у представителей рода *Pinus* (Пахарькова и др., 2019).

Модельные деревья сосны сибирской в рамках данного исследования также оказались неоднородными по накоплению dhn. Для деревьев 4 и 9 характерно более высокое содержание dhn по сравнению с деревьями 19 и 20 этого же участка. Для древостоев, произрастающих

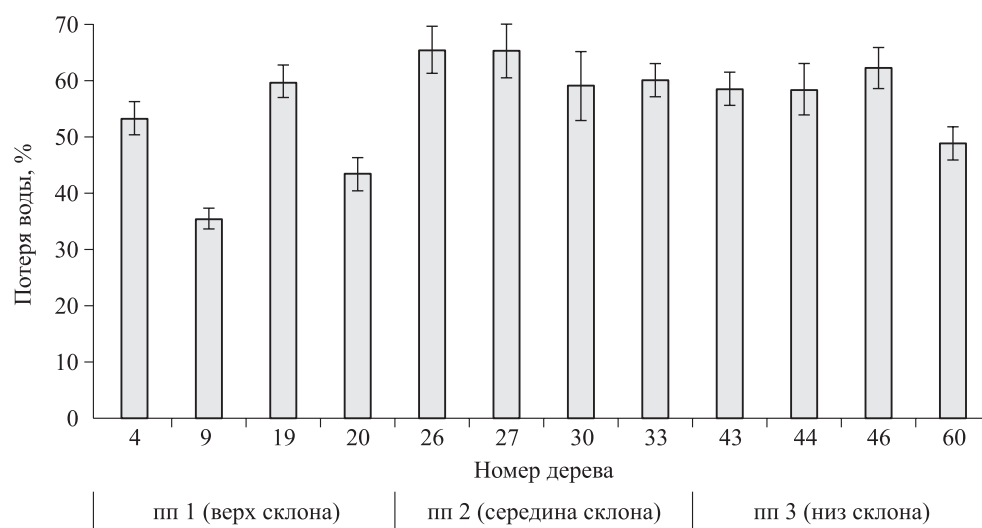


Рис. 5. Потери воды при высушивании хвои до абсолютно сухого состояния.

в нижней части склона (пп 3) также отмечена неоднородность в накоплении dhn, более интенсивное окрашивание белкового пятна определено для деревьев под номерами 46 и 60, что отражает внутривидовые различия в уровне накопления дегидринов. На средней пробной площади (пп 2) накопление dhn стабильно и не показывает существенных различий между деревьями внутри площади.

Наименьшее содержание воды в хвое в период перехода в состояние зимнего покоя характерно для открытых местообитаний верхней пробной площади. При отрицательных температурах воздуха маломощные почвы быстро промерзают, а снеговой покров ложится поздно из-за сильных ветров. В целом по всем пробным площадям выявлена отрицательная зависимость между содержанием воды в хвое и содержанием dhn 65 кДа (коэффициент корреляции между потерей воды при высушивании хвои до абсолютно сухого состояния и содержанием белка dhn 65 кДа составляет -0.78), что соответствует современным представлениям о протекторной роли дегидринов при действии водного дефицита (Perdiguer et al., 2012; Kjellsen et al., 2013; Aziz et al., 2021).

Можно отметить, что у успешных по наращиванию биомассы хвои деревьев (9 и 20), хвоя содержит меньше воды при переходе к периоду покоя по сравнению с другими экземплярами сосны сибирской (рис. 5).

Для дерева 9 оказался также существенно повышенным уровень dhn 65 кДа, что, по-видимому, стало реакцией на значительное снижение содержания воды в осенне-зимний период (см. рис. 4). Возможно, индивидуальная генетически

закрепленная особенность деревьев 9 и 20 – способность эффективно совмещать интенсивные ростовые процессы в период вегетации с сезонной акклимацией при переходе к периоду покоя, что может указывать на селекционную перспективность этих деревьев.

В осенний период структурно-функциональная организация фотосинтетического аппарата претерпевает существенные изменения, вызванные низкими положительными, а затем и отрицательными температурами, направленные на формирование механизмов адаптации к меняющимся условиям. Функции dhn при этом заключаются в удержании воды и защите белков и мембран от неспецифических взаимодействий в период холодного обезвоживания внутриклеточной среды. Деревья 9 и 60 – не только высокопродуктивны, но и устойчивы к климатогенному стрессу, вызванному потерей воды клетками хвои при наступлении отрицательных температур, и могут быть определены как наиболее перспективные для получения семян и воспроизводства лесов (дерево 9 – для открытых местообитаний, дерево 60 – под пологом леса) в условиях изменения климата. В свою очередь, метод определения dhn в хвое может быть использован для отбора более резистентных форм к потере воды при переходе в состояние зимнего покоя.

Таким образом, на основании изучения накопления белков-дегидринов в хвое деревьев сосны сибирской в условиях высотной поясности (на примере хр. Ергаки Западного Саяна) в период перехода в состояние зимнего покоя, выявлены значительные внутривидовые различия между растениями сосны сибирской

не только в различных условиях произрастания (пп 1 – пп 3), но и в пределах одной пробной площади. В совокупности с оценкой биомассы хвои это позволяет выявить перспективные экземпляры сосны сибирской для дальнейшей селекционной работы в целях воспроизводства лесов в условиях изменения климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для данного вида исследованы особенности накопления стрессовых белков-дегидринов (dhn) в хвое в период перехода в состояния зимнего покоя в условиях высотной поясности. В ходе исследования было выявлено, что для открытых местообитаний сосны сибирской, расположенных выше границы леса (пп 1), характерно достоверное увеличение в накоплении dhn 65 кДа в хвое, что, по-видимому, связано с повышенной потерей воды хвоей растений на этой пробной площади. Выявленные у отдельных деревьев сосны сибирской отличия (по накоплению dhn 65 кДа, массе хвои и содержанию воды в хвое) могут быть использованы в селекции данного вида и для разработки комплексного подхода по выявлению устойчивых и продуктивных деревьев сосны сибирской, приуроченных к различным условиям местообитания.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 23-24-00251 «Внутрипопуляционная изменчивость экофизиологических признаков деревьев сосны сибирской (Pinus sibirica Du Tour) в условиях изменения климата».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Азаркович М. И. Дегидрины в ортодоксальных и рекальцитрантных семенах // Физиол. раст. 2020. Т. 67. № 2. С. 130–140.
- Алексеев В. М., Константинов А. В., Бурцев Д. С. Реакция лесов на изменение климата // Инновации и технологии в лесном хозяйстве – 2013: Материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, СПбНИИЛХ, 22–24 мая 2013 г. СПб.: СПбНИИЛХ, 2013. Ч. 1. С. 26–34.
- Коротаева Н. Е., Иванова М. В., Суворова Г. Г., Боровский Г. Б. Дегидрины в адаптации сосны обыкновенной и ели сибирской к условиям произрастания в период вегетации // Сиб. лесн. журн. 2020. № 6. С. 54–63.
- Коротаева Н. Е., Шмаков В. Н., Молдавская С. Э. Влияние водного дефицита на накопление дегидринов в клетках каллусной культуры сосны обыкновенной // ИВУЗ. Прикл. хим. и биотехнол. 2023. Т. 13. № 4. С. 519–587.
- Пахарькова Н. В., Кузьмина Н. А., Кузнецова Г. В., Кузьмин С. Р. Диагностика устойчивости представителей рода *Pinus* к периодическим повышением температуры в зимне-весенний период // Изв. СПбЛТА. 2019. № 227. С. 88–106.
- Пахарькова Н. В., Гаевский Н. А., Гетте И. Г. Параметры фотосинтетического аппарата *Pinus sibirica* в фенотипировании деревьев в условиях высотной поясности Западного Саяна // Журн. СФУ. Биол. 2024а. № 17 (2). С. 119–133.
- Пахарькова Н. В., Масенцова И. В., Гетте И. Г., Позднякова Е. Е., Калабина А. А. Фотосинтетический аппарат хвои сосны сибирской кедровой в период выхода из состояния зимнего покоя в условиях высотной поясности Западного Саяна // Сиб. лесн. журн. 2024б. № 2. С. 41–49.
- Петров И. А., Харук В. И., Двинская М. Л., Им С. Т. Реакция хвойных экотона альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау на изменение климата // Сиб. экол. журн. 2015. № 4. С. 518–527.
- Петров И. А., Шушпанов А. С., Голуков А. С., Двинская М. Л., Харук В. И. Динамика древесно-кустарниковой растительности в горной лесотундре Восточного Саяна // Экология. 2021. № 5. С. 372–379.
- Погода и климат, 2025. <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/29974.htm>
- Природный парк «Ергаки». Климат, 2025. <https://www.ergaki-park.ru/about/klimat/>
- Прожерина Н. А., Наквасина Е. Н. Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород Европейского Севера России // ИВУЗ. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 9–25.
- Сергиенко В. Г. Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата // Тр. СПбНИИЛХ. 2015. № 1. С. 5–19.
- Татарина Т. Д., Перк А. А., Пономарев А. Г., Васильева И. В. Особенности стрессовых белков-дегидринов березы *Betula L.* в условиях криолитозоны // Сиб. лесн. журн. 2020. № 2. С. 21–30.
- Татарина Т. Д., Перк А. А., Пономарев А. Г., Васильева И. В. Связь дегидринов с адаптацией лиственницы Каяндера к условиям криолитозоны Якутии // Физиол. раст. 2023. Т. 70. № 5. С. 537–546.
- Усольцев В. А. Продуктивность ассимиляционного аппарата лесообразующих видов в климатических градиентах Евразии // Сиб. лесн. журн. 2017. № 4. С. 52–65.
- Юзбеков А. К. Сезонная динамика фотосинтетической продуктивности ели европейской в лесных сообществах Валдая // Экол. мониторинг и моделирование экосист. 2022. Т. 33. № 3–4. С. 37–51.
- Azarkovich M. I. Dehydrins in orthodox and recalcitrant seeds // Rus. J. Plant Physiol. 2020. V. 67. Iss. 2. P. 221–230 (Original Rus. Text © M. I. Azarkovich, 2020, publ. in Fiziologiya rasteniy. 2020. N. 2. P. 130–140).
- Aziz M., Sabeem M., Mullath S. K., Brini F., Masmoudi K. Plant group II LEA proteins: Intrinsically disordered structure for multiple functions in response to environmental stresses // Biomolecules. 2021. V. 11. Iss. 11. Article 1662. 27 p.
- Aitken S. N., Yeaman S., Holliday J. A., Wang T., Curtis-McLane S. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations // Evol. Appl. 2008. V. 1. Iss. 1. P. 95–111.

- Colmer T. D., Flowers T. J., Munns R. Use of wild relatives to improve salt tolerance in wheat // J. Exp. Bot. 2006. V. 57. Iss. 5. P. 1059–1078.
- Harsch M. A., Hulme P. E., McGlone M. S., Dunca R. P. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming // Ecol. Lett. 2009. V. 12. Iss. 10. P. 1040–1049.
- Kartashov A. V., Zlobin I. E., Pashkovskiy P. P., Pojidaeva E. S., Ivanov Y. V., Mamaeva A. S., Fesenko I. A., Kuznetsov V. V. Quantitative analysis of differential dehydrin regulation in pine and spruce seedlings under water deficit // Plant Physiol. Biochem. 2021. V. 162. P. 237–246.
- Kharuk V. I., Im S. T., Dvinskaya M. L. Forest-tundra ecotone response to climate change in the Western Sayan Mountains, Siberia // Scand. J. For. Res. 2010. V. 25. Iss. 3. P. 224–233.
- Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. Alpine ecotone in the Siberian mountains: vegetation response to warming // J. Mount. Sci. 2021. V. 18. Iss. 12. P. 3099–3108.
- Kharuk V. I., Petrov I. A., Golyukov A. S., Im S. T., Shushpanov A. S. Mountain taiga in a warming climate: Contrast of Siberian Pine growth along an elevation gradient // Forests. 2024. V. 15. Iss. 1. Article 50. 13 p.
- Kjellsen T. D., Yakovlev I. A., Fossdal C. G., Strimbeck G. R. Dehydrin accumulation and extreme low-temperature tolerance in Siberian spruce (*Picea obovata*) // Tree Physiol. 2013. V. 33. Iss. 12. P. 1354–1366.
- Kosová K., Vitémvás P., Prášil I. T. Wheat and barley dehydrins under cold, drought, and salinity – what can LEA-II proteins tell us about plant stress response? // Front. Plant Sci. 2014. V. 5. Article 343.
- Korotaeva N. E., Oskorbina M. V., Kopytova L. D., Suvorova G. G., Borovskii G. B., Voinikov V. K. Variations in the content of stress proteins in the needles of common pine (*Pinus sylvestris* L.) within an annual cycle // J. For. Res. 2012. V. 17. Iss. 1. P. 89–97.
- Korotaeva N., Romanenko A., Suvorova G., Ivanova M., Lomovatskaya L., Borovskii G., Voinikov V. Seasonal changes in the content of dehydrins in mesophyll cells of common pine needles // Photosynth. Res. 2015. V. 124. Iss. 2. P. 159–169.
- Larcher W., Kainmüller C., Wagner J. Survival types of high mountain plants under extreme temperatures // Flora: Morphol., Distribut., Funct. Ecol. Plants. 2010. V. 205. Iss. 1. P. 3–18.
- Neuner G., Huber B., Plangger A., Pohl J.-M., Walde J. Low temperatures at higher elevations require plants to exhibit increased freezing resistance throughout the summer months // Environ. Exp. Bot. 2020. V. 169. Article 103882.
- Petrov I. A., Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Im S. T. Reaction of coniferous trees in the Kuznetsk Alatau alpine forest-tundra ecotone to climate change // Contemp. Probl. Ecol. 2015. V. 8. Iss. 4. P. 423–430 (Original Rus. Text © I. A. Petrov, V. I. Kharuk, M. L. Dvinskaya, S. T. Im, 2015, publ. in Sib. Ecol. Zhurn. 2015. N. 4. P. 518–527).
- Petrov I. A., Shushpanov A. S., Golyukov A. S., Dvinskaya M. L., Kharuk V. I. Dynamics of tree and shrub vegetation in the eastern Sayan mountain tundra // Rus. J. Ecol. 2021. V. 52. Iss. 5. P. 399–405 (Original Rus. Text © Petrov I. A., Shushpanov A. S., Golyukov A. S., Dvinskaya M. L., Kharuk V. I., 2021, publ. in Ekologiya. 2021. N. 5. P. 372–379).
- Perdiguer P., Barbero M. C., Cervera M. T., Soto A., Colada C. Novel conserved segments are associated with differential expression patterns for Pinaceae dehydrins // Planta. 2012. V. 236. Iss. 6. P. 1863–1874.
- Riyazuddin R., Nisha N., Singh K., Verma R., Gupta R. Involvement of dehydrin proteins in mitigating the negative effects of drought stress in plants // Plant Cell Rep. 2022. V. 41. Iss. 2. P. 519–533.
- Rosbakh S., Hartig F., Sandanov D. V., Bukharova E. V., Miller T. K., Primack R. B. Siberian plants shift their phenology in response to climate change // Glob. Change Biol. 2021. V. 27. Iss. 18. P. 4435–4448.
- Scheller H. V., Haldrup A. Photoinhibition of photosystem I // Planta. 2005. V. 221. Iss. 1. P. 5–8.
- Sena J. S., Giguère I., Rigault P., Bousquet J., Mackay J. Expansion of the dehydrin gene family in the Pinaceae is associated with considerable structural diversity and drought-responsive expression // Tree Physiol. 2018. V. 38. Iss. 3. P. 442–456.
- Singh S. Understanding the role of slope aspect in shaping the vegetation attributes and soil properties in Montane ecosystems // Tropical Ecol. 2018. V. 59. Iss. 3. P. 417–430.
- Tatarinova T. D., Perk A. A., Ponomarev A. G., Vasil'eva I. V. Relationship between dehydrins and adaptation of Ca-yander larch to Yakutia cryolithozone conditions // Rus. J. Plant Physiol. 2023. V. 70. Article 99 (Original Rus. Text © T. D. Tatarinova, A. A. Perk, A. G. Ponomarev, I. V. Vasil'eva, 2023, publ. in Fiziol. rast. 2023. V. 70. N. 5. P. 537–546).
- Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Soja A. J. Climate change and climate-induced hot spots in forest shifts in central Siberia from observed data // Reg. Environ. Change. 2011. V. 11. Iss. 4. P. 817–827.
- Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Bazhina E. V., Soja A. J., Groisman P. Y. Droughts are not the likely primary cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* forest dieback in the south Siberian mountains // Forests. 2022. V. 13. Iss. 9. Article 1378. 19 p.
- Velasco-Conde T., Yakovlev I., Majada J. P., Aranda I., Johnsen Ø. Dehydrins in maritime pine (*Pinus pinaster*) and their expression related to drought stress response // Tree Genet. Genom. 2012. V. 8. Iss. 5. P. 957–973.
- Vuosku J., Martz F., Hallikainen V., Rautio P. Changing winter climate and snow conditions induce various transcriptional stress responses in Scots pine seedlings // Front. Plant Sci. 2022. V. 13. Article 1050903.
- Welling A., Rinne P., Viherä-Aarnio A., Kontunen-Soppela S., Heino P., Palva E. T. Photoperiod and temperature differentially regulate the expression of two dehydrin genes during overwintering of birch (*Betula pubescens* Ehrh.) // J. Exp. Bot. 2004. V. 55. Iss. 396. P. 507–516.
- Yakovlev I. A., Asante D. K. A., Fossdal C. G., Partanen J., Junttila O., Johnsen Ø. Dehydrins expression related to timing of bud burst in Norway spruce // Planta. 2008. V. 228. Iss. 3. P. 459–472.

ACCUMULATION OF DEHYDRINS IN SIBERIAN STONE PINE NEEDLES IN THE CONDITIONS OF THE HIGH-ALTITUDE ZONE OF THE WESTERN SAYAN

I. G. Gette¹, N. V. Pakharkova¹, N. E. Korotaeva²

¹ Siberian Federal University

Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

² Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Lermontov str., 132, Irkutsk, 664033 Russian Federation

E-mail: igette@sfu-kras.ru, npakharkova@sfu-kras.ru, knev73@yandex.ru

Current climate change has a significant impact on the functioning of forest ecosystems. For mountainous areas, it is typical for undergrowth to colonize new territories. An urgent task in the observed conditions is to study the adaptation mechanisms of dominant trees. The object of the study was Siberian stone pine trees (*Pinus sibirica* Du Tour) of the second age class, growing in the conditions of the altitudinal zonation of the Western Sayan. Important biochemical factors of resistance to stress associated with moisture loss include the synthesis of hydrophilic proteins. For the first time for this species, the features of accumulation of stress proteins-dehydrins (dhn) in needles during the transition to winter dormancy in conditions of altitudinal zonation were studied. It was found that open habitats of Siberian pine growing above the forest line are characterized by a reliable increase in the accumulation of dhn 65 kD in needles. In the studied areas, significant differences in the accumulation of stress protein in individual trees were recorded. The trees most resistant to climatogenic stress were identified as the most promising for obtaining seeds and reproducing forests under climate change conditions. The results obtained suggest the possibility of using the definition of dhn in needles, in combination with other parameters, to develop a comprehensive approach to identifying resistant and productive trees.

Keywords: *Pinus sibirica* Du Tour; dehydrin proteins, winter dormancy.

How to cite: Gette I. G., Pakharkova N. V., Korotaeva N. E. Accumulation of dehydrins in Siberian stone pine needles in the conditions of the high-altitude zone of the Western Sayan // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2025. N. 3. P. 28–36 (in Russian with English abstract and references).