

УДК 551.583.15

## ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ ВЛАГОЗАПАСА СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ПРЕДГОРЬЯХ ВОСТОЧНОГО САЯНА НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ СДВИГОВ

Е. Ф. Тропина<sup>1</sup>, А. А. Кнорре<sup>1,2</sup>, М. Г. Ерунова<sup>1,3</sup>, М. К. Целихин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный парк «Красноярские Столбы»  
660006, Красноярск, ул. Карьерная, 26а

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»  
660036, Красноярск, Академгородок, 50

E-mail: tropina-soil@yandex.ru, nau-stolby@yandex.ru, marina@icm.krasn.ru, big.mikle@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

Исследованы многолетние вариации параметров снежного покрова в подтаежной и горно-таежной группе лесов заповедной территории национального парка «Красноярские Столбы». Выявлено значительное сокращение сроков залегания устойчивого снежного покрова (~20 дней) за счет более позднего установления и более раннего схода. Показана возможность расчета влагозапаса в снеге по мощности снежного покрова ( $r = 0.74-0.96$ ;  $p < 0.001$ ) в конкретных условиях. Определены наиболее стабильные участки территории с высотой снега 50–70 см ( $V < 50\%$ ), на которые приходилось в разные годы от 52 до 71 % всей территории ООПТ, за исключением критически многоснежного 2021 г. (всего 28 % территории). Общий суммарный влагозапас снежного покрова на начало снеготаяния в зависимости от погодных условий конкретного года варьировал от 46.6 до  $89.7 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> при средневзвешенном влагозапасе на единицу площади от 98.8 до 190.1 мм. Представленные данные сопоставимы с ранее опубликованными для других территорий Красноярского края (Буренина и др., 2013) и Сибири (Доклад..., 2019–2023), что дает возможность дальнейшего углубленного анализа связи расчетных данных по влагозапасу снега с климатическими параметрами среды на более длительной временной шкале.

**Ключевые слова:** влагозапас снежного покрова, биоклиматическая поясность, климатические изменения, зимний период, ГИС-технологии, национальный парк «Красноярские Столбы».

DOI: 10.15372/SJFS20240405

### ВВЕДЕНИЕ

Изменению климата в Сибири посвящено множество исследований, в некоторых из них указывается, что наибольшие климатические сдвиги наблюдаются в южных районах Западной и Средней Сибири (Чебакова, Парфенова, 2006; Паромов и др., 2017; Гончарова, Кнорре, 2018). При этом потепление зимнего периода выражено наиболее ярко в сравнении с летним периодом и среднегодовым повышением температур в целом.

Так, по данным Н. М. Чебаковой и Е. И. Парфеновой (2006), с 50-х годов до конца XX в. на

территории Средней Сибири зимнее потепление на юге, особенно в горах, составило 2–4 °С, в то время, как летнее потепление для всего региона оценивается лишь в 1 °С. Изменения осадков за тот же период имеют более сложный характер, однако для юга Сибири отмечается общее уменьшение их количества на 4–8 % (Кнорре и др., 2021).

Схожие тенденции отмечены В. В. Паромовым с соавт. (2017) на территории Западной Сибири. Среднегодовые температуры воздуха за 1986–2015 гг. в этом регионе повсеместно увеличились по отношению к климатической норме (1966–1985 гг.). При этом наиболее зна-

чимые изменения отмечены в зимний период года в ландшафтных зонах средней – южной тайги (на 1.5 °С) и южной тайги – лесостепи (на 1.4 °С), в то время как температура летнего периода показала рост на 0.5–0.6 °С.

В связи с данной климатической тенденцией рассматриваются как адаптационные возможности различных хвойных пород к происходящим изменениям (Пахарькова, Михальчук, 2015; Тихонова, Корец, 2021), так и возможные сценарии дальнейшей трансформации растительного покрова в регионе с изменением расположения растительных зон в Сибири (Парфенова и др., 2004; Чебакова, Парфенова, 2006). Зонай своеобразного трансформационного напряжения, по мнению указанных авторов, является широкая полоса растительного покрова, проходящая по долине р. Енисей вплоть до южной границы плато Путорана. В нее попадают и таежные экосистемы национального парка «Красноярские Столбы».

Яркой иллюстрацией уже начавшейся трансформации растительного покрова этой особо охраняемой природной территории (ООПТ) является массовая гибель пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) вследствие масштабной инвазии короеда уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) (Кнорре и др., 2015). Инвазия данного вида приобрела масштабный характер и затронула практически всю территорию России с участками произрастания данного вида пихты. Наиболее вероятная причина ослабления пихты, способствовавшей столь губительному влиянию короедов-инвайдеров, по мнению В. И. Харука с соавт. (2019; Kharuk et al., 2019), в нашем регионе – длительный водный стресс, наличие которого подтверждается усилением зависимости индекса радиального прироста (ИП) пихты сибирской от индекса сухости (SPEI) и влажности корнеобитаемого слоя (ВКС) с 1985 по 2017 г.

В результате синергетического воздействия водного стресса и короедов, размножению которых также благоприятствовало увеличение вегетационного периода, наибольшие повреждения пихтовых древостоев произошли в течение всего 3 лет (2014–2016 гг.) и охватили к 2017 г. 75 % площади пихтарников ООПТ (Харук и др., 2019; Kharuk et al., 2019). Обработка материалов дистанционного зондирования Земли, выполненная специалистами Центра защиты леса Красноярского края (филиал ФБУ «Рослесозащита»), показала, что суммарная площадь поврежденных древесных насаждений на данной терри-

тории к началу августа 2019 г. составила свыше 20 тыс. га (Шайдулов и др., 2019).

Влияние температурного фактора на активность фотосинтетического аппарата пихты сибирской и ели сибирской (*Picea obovate* Ledeb.) в осенне-зимний период на территории национального парка оценивалось методом РАМ-флуориметрии (Пахарькова, Михальчук, 2015). Установлено, что роль температур для возобновления фотосинтетической активности по показателю эффективного фотохимического квантового выхода  $\Upsilon(II)$  в зимне-весенний период ожидаемо выше, чем в осенний. В осенний период фотосинтетическая активность наиболее сильно коррелировала с ходом максимальных дневных, а не среднесуточных температур. При этом авторы исследования указывают на тот факт, что реакция на температурные изменения более ярко выражена у хвои второго года жизни, по сравнению с хвоей первого года, а пихта и ель в осенний период более чувствительны к изменениям температуры по сравнению с представителями рода сосна (*Pinus* L.).

Активизация фотосинтетической активности ранней весной и неизбежное усиление транспирации при отсутствии поступления воды из почвы приводит к обезвоживанию хвои, вплоть до ее усыхания. Особенно страдает хвоя первого года жизни, имеющая менее плотную кутикулу. Среди хвойных пород национального парка именно пихта наиболее подвержена этому явлению, особенно молодые деревья, а частота его проявления в последние годы заметно увеличилась в связи с ростом ранневесенних температурных аномалий.

В большинстве упомянутых исследований основное внимание уделялось температурному фактору и его влиянию на физиологические процессы. Отсутствие непосредственной связи ИП пихты с осадками при достоверном наличии водного стресса (Харук и др., 2019; Kharuk et al., 2019) и одновременно опровержение наличия процессов иссушения климата другими авторами (Tshebakova et al., 2022) заставляет обратить более пристальное внимание на вопрос формирования почвенного влагозапаса к началу вегетационного периода.

Огромное значение для наполнения почвы влагой имеет влагозапас в снежном покрове, накопленный к началу активного снеготаяния.

Проблеме оценки снегозапасов на лесных территориях как в Сибири, так и за ее пределами посвящено множество работ, в которых используются различные подходы (Онучин,

Протопопов, 1984; Протопопов, Онучин, 1992; Григорьев, Телегина, 2015; Онучин, Данилова, 2017; Онучин, Буренина, 2018), рассматривается влияние отдельных факторов среды, включая антропогенные воздействия (Онучин, Данилова, 2012; Буренина и др., 2013).

При интенсификации климатических сдвигов особую актуальность приобретает оценка пространственно-временной динамики влагозапаса снежного покрова (СП) как основы пополнения ресурсов почвенных вод. Понимание масштаба этих флуктуаций, возможно, даст ключ к пониманию механизмов формирования водного стресса у чувствительных видов растений, таких как пихта сибирская.

В данной работе оценивался современный диапазон варьирования общего влагозапаса СП, сформированный к началу марта в низкогорьях Восточного Саяна, находящихся на контакте с лесостепью. Оценка влагозапаса СП проводилась на основе масштабной снегомерной съемки территории национального парка «Красноярские Столбы» за период 2018–2023 гг. Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

1) проанализирована пространственная неоднородность снежного покрова по его высоте с использованием статистических и картографических методов;

2) выполнены расчеты влагозапаса СП на основе данных натурных исследований, регрессионного анализа и ГИС-технологий;

3) определены зоны максимальной нестабильности снегонакопления по критериям высоты снега и влагозапаса СП;

4) выполнен сравнительный анализ итогового влагозапаса СП с данными из официальных источников;

5) представлен результат исследования на фоне многолетних трендов по срокам залегания постоянного СП за 70 лет метеонаблюдений на данной территории.

Настоящая работа является частью программы комплексного экологического мониторинга, проводимого на территории национального парка «Красноярские Столбы».

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования послужила территория национального парка «Красноярские Столбы», расположенная в северо-западной оконечности Куйсумского хребта Восточного Саяна.

В геоморфологическом отношении – это междуречье правых притоков р. Енисей (Базаихи, Маны и Большой Слизневой), 93.5 % площади которого находится в диапазоне абсолютных отметок от 300 до 700 м н. у. м. Участки с высотой местности свыше 700 м н. у. м. занимают незначительную площадь территории (2.2 %), как и участки ниже 300 м н. у. м. (4.3 %). Максимальные высоты – Кайдынский хребет (832 м н. у. м., южная оконечность) и г. Абатак (803 м н. у. м., восточная оконечность).

Центральная часть территории приподнята, неоднородна по своей структуре и состоит из трех хребтов, переходящих один в другой. Высокие водоразделы южной и центральной части национального парка часто представлены типичными выровненными поверхностями древнего пенеплена, переходящими в покатые склоны, а местами – обрывающиеся структурно-денудационными уступами. В направлении с юга на север снижается абсолютная высота местности. В северной части и по периферии рельеф имеет сильно расчлененный характер, среди форм преобладают гребневидные водоразделы, эродированные крутые склоны, иногда с осыпями и выходами скал. Долины большинства ручьев и рек узкие и слабо разработанные (рис. 1).

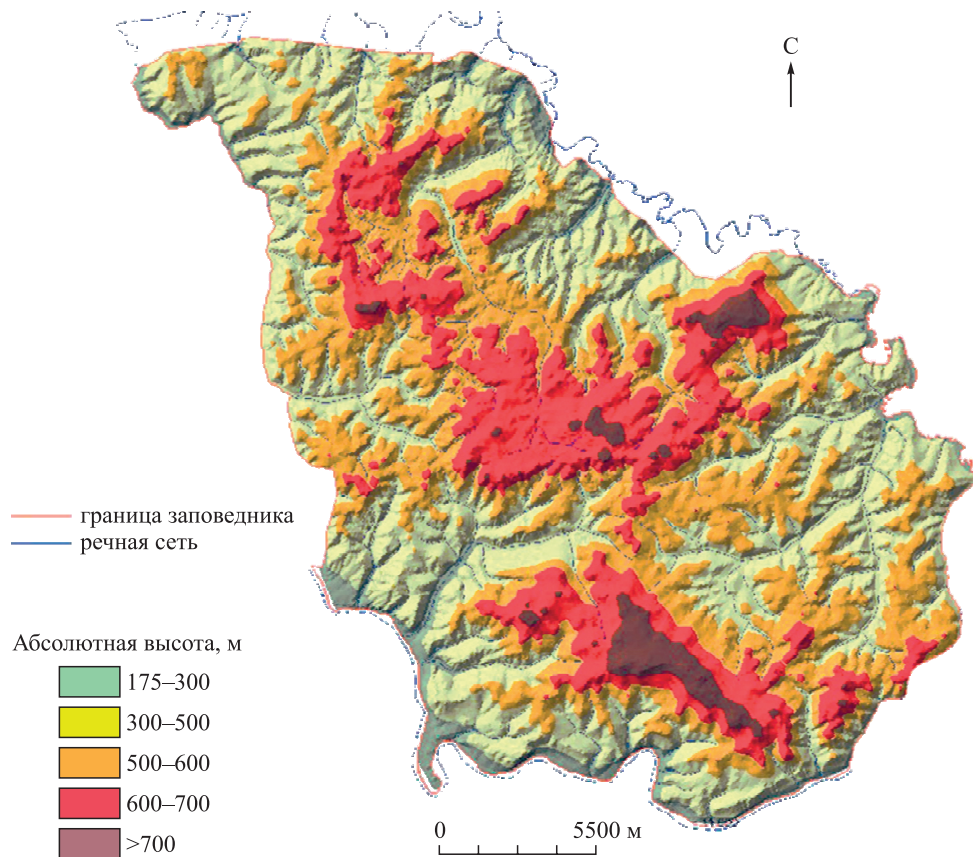
Благодаря такому орографическому строению на территории выделяется два высотных пояса – нижний (до 500 м н. у. м.) и верхний (500–800 м н. у. м.), примерно равных по площади (50.5 и 49.5 % соответственно), но отличающихся не только формами рельефа, но и климатическими характеристиками, и растительным покровом. Т. Н. Буториной (1961) они определены как средне- и низкогорный.

Биоклиматические пояса имеют концентрическую структуру размещения (Назимова и др., 2010):

– пояс горной темнохвойной тайги с включением интразональных сосняков, занимающий центральную, наиболее возвышенную, часть ООПТ;

– пояс светлохвойных и мелколиственно-светлохвойных лесов с элементами степных сообществ, долинными лугами и долинными темнохвойными (преимущественно еловыми) лесами, расположенный по периферии.

Растительный покров нижнего пояса национального парка крайне неоднороден, поскольку вмещает биогеоценозы (БГЦ) с характерными специфическими чертами трех ботанико-географических районов: Красноярской лесостепи, горной тайги Восточного Саяна и подтайги



**Рис. 1.** Гипсометрическая карта-схема территории национального парка «Красноярские Столбы» (Проект..., 2007).

Среднесибирского плоскогорья (Андреева, Тупицына, 2014).

До инвазии короеда полиграфа уссурийского, уничтожившего большую часть пихтовых древостоев, 98 % земель ООПТ были покрыты лесом. Доля нелесных земель (степи, луга, скалы, каменистые осыпи и пр.) не превышала 2 %. Среди лесообразующих пород абсолютно преобладали сосняки (45.5 %) и пихтачи (29.6 %), роль в структуре лесов ели, осины (*Populus tremula* L.) и лиственницы (*Larix* Mill.) была заметно ниже (7.5; 6.7 и 6.3 % соответственно) (Проект..., 2007).

Горно-таежный пояс национального парка характеризуется умеренно холодным климатом. Среднегодовая температура воздуха за последние 20 лет составила 0.6 °С. Средние многолетние температуры самого холодного месяца (январь) –16.3 °С, самого жаркого (июль) 16.8 °С (Андреева, Тупицына, 2014). Средняя относительная влажность воздуха 77 %, от трети до половины годовой нормы осадков приходится на летние месяцы. Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова к началу XXI в. составляла в среднем 200 дней.

Климат пояса лиственно-светлохвойных лесов, в сравнении с климатом горно-таежного пояса, менее холодный, но с более резко выраженной континентальностью (годовая амплитуда температур воздуха 34.2 °С). Здесь выпадает примерно на 25 % меньше осадков, а средняя относительная влажность воздуха – 66 %. Вегетационный период в нижнем поясе продолжительнее примерно на 2 нед.

Многолетними данными, полученными на метеостанции «Столбы» (горно-таежный пояс, 532 м н. у. м.), подтверждается не только общее потепление климата данной территории, но и заметное потепление зим. За период с 1947 по 2016 г. среднегодовая температура увеличилась на 1.8 °С, а средняя температура зимы возросла на 2.6 °С (Гончарова, Кнорре, 2018). Параллельно с потеплением последние два десятилетия развивается устойчивый тренд на уменьшение среднегодового количества осадков: с 1947 по 2006 г. по десятилетним циклам оно составляло в среднем 680.0 мм; с 2007 по 2016 г. – 629.3 мм; с 2017 по 2022 г. – 566.8 мм. Таким образом, наблюдается не просто снижение годового поступления осадков, но и интенсификация данного

процесса во времени. Причем длительные изменения в накоплении зимних осадков (ноябрь – март) также имеют тенденцию на снижение (Кнорре и др., 2021).

Поступление твердых атмосферных осадков как одного из метеопараметров среды определяется на м/с «Столбы» классическим методом с использованием осадкомера Третьякова. Наблюдения за динамикой снегонакопления и снеготаяния осуществляются на шести постоянных снегомерных площадках: в горно-таежном поясе – на м/с «Столбы»; в низкогорном – на 5 площадках, расположенных по периферии национального парка.

Для детализации пространственного распределения снежного покрова по территории ООПТ в конце зимнего периода (конец февраля – первая декада марта) осуществлялись единовременные снегомерные наблюдения на постоянных маршрутах с учетом общих рекомендаций Росгидромета (Наставление..., 1969). Ежегодная протяженность снегомерных маршрутов в среднем за период составила 330.7 км и охватила большую часть национального парка с различными орографическими условиями. Измерения высоты снега на маршрутах выполнялись с интервалом около 1 км на участках без явных признаков метелевых наносов и влияния крон темнохвойных пород (чтобы исключить перехват снега).

По результатам снегомерной съемки с GPS-позиционированием средних значений в программе ArcGIS с использованием интерполятора обратно взвешенных расстояний (InverseDistanceWeighted – IDW) построены карты высоты снежного покрова (ВСП). Основные классы легенды выделялись с шагом 10 см высоты снега. Начальный класс включал все малоснежные участки – с высотой снега до 30 см включительно, а конечный – участки с высотой снега более 100 см. Изменение размерности краевых классов легенды обусловлено крайне низкими суммарными площадями участков с экстремальными значениями высоты снега (как минимальными, так и максимальными). На полученном картографическом материале в программе ArcGIS проводился расчет площадей по классам ВСП. При этом подразумевалось, что классы ВСП отражают различия не только по высоте, но и по структуре снежной толщ, поскольку высота является функцией режима снегонакопления.

Плотность снега определялась на 22 постоянных участках мониторинга химического состава снежной воды, расположенных в разных

ландшафтных условиях национального парка (Тропина, Кнорре, 2019). Пробы отбирались на всю глубину снежного покрова (Василенко и др., 1985) с помощью полимерной трубы диаметром 10.3 см. Плотность снега определялась из осредненной пробы общей массой не менее 3.5 кг (3 керна и более в зависимости от высоты снега).

Эмпирические данные о высоте и плотности снега на опорных пунктах послужили основой для определения математической зависимости влагозапаса ( $y$ ) от высоты снежного покрова ( $x$ ) для каждого зимнего периода. Влагозапас СП рассчитывался для всех участков ООПТ с известной высотой снега и координатами через уравнения линейной регрессии (Львовский, 1988). На основании полученных эмпирических и расчетных данных влагозапаса СП построены рабочие карты для каждого зимнего периода. Основные классы влагозапаса в легенде выделены с размерностью в 10 мм, размер крайних классов, в силу незначительной площади с экстремальными значениями немного расширен ( $< 20 \text{ мм} \dots > 10 \text{ мм}$ ). Для каждого выделенного класса влагозапаса в программе ArcGIS проведен расчет занимаемой площади (в га). В дальнейшем полученные по классам влагозапаса СП средние объемы снежной воды суммировались. Средневзвешенный показатель рассчитывался как отношение суммарного влагозапаса к площади. Статистическую обработку данных проводили в программе Excel (Microsoft Office Professional Plus 2016) с использованием стандартного пакета анализа данных.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственный рисунок снежного покрова (по ступеням высоты) в конце зимнего периода в разные годы исследования отличается высокой изменчивостью, особенно в пределах Центрального хребта (рис. 2).

Наибольшим сходством территориального распределения участков с различной высотой снега характеризуются карты ВСП за 2018, 2019 и 2022 гг. Пространственная неоднородность СП в 2020 и 2021 гг. имеет экстремально противоположные варианты для 6-летнего периода (min количество классов ВСП и max количество классов ВСП соответственно) (табл. 1).

Группировка данных по классам ВСП в три более крупные категории – малоснежные участки ( $< 50 \text{ см}$ ), со средней мощностью снежного

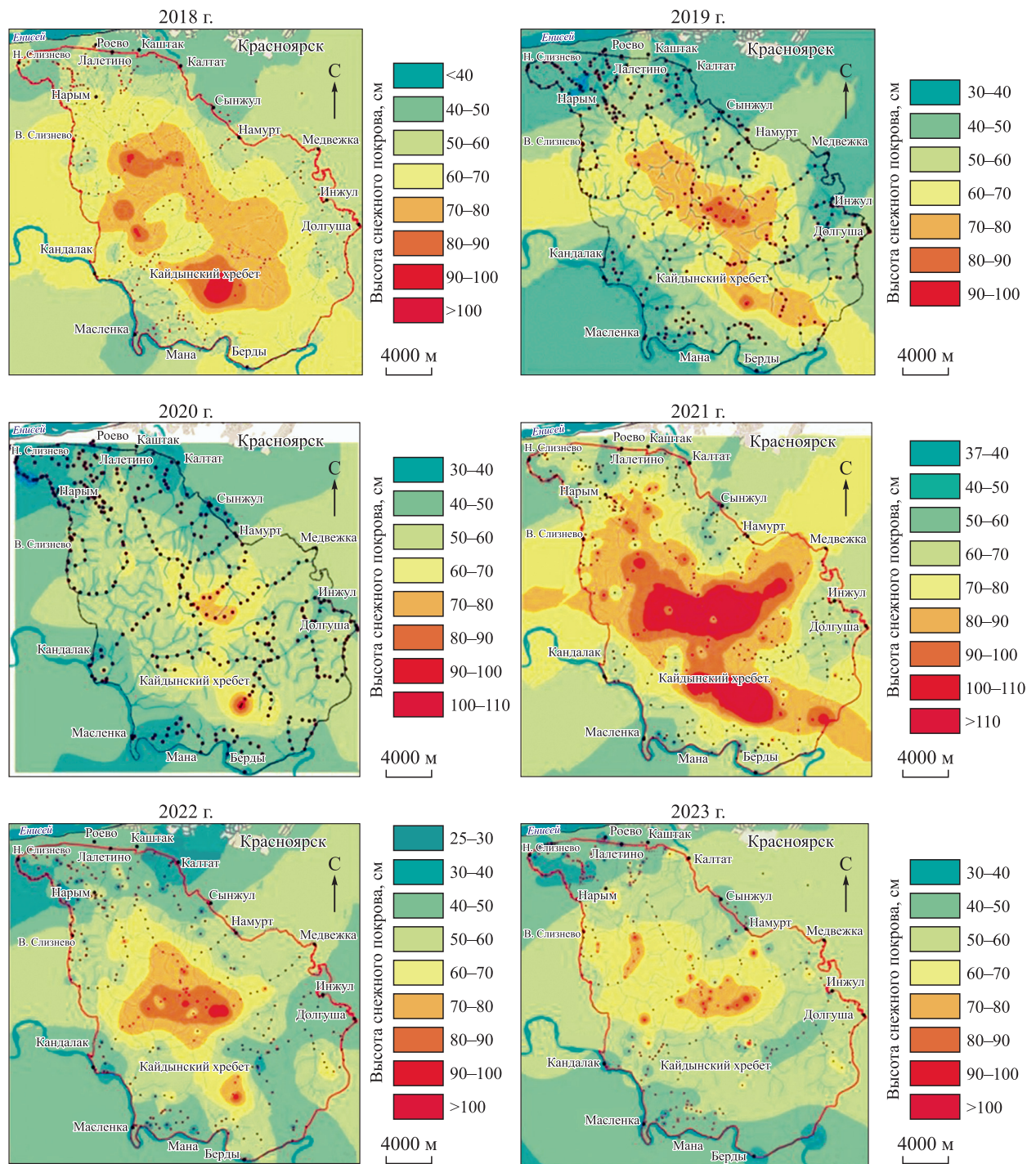


Рис. 2. Пространственная неоднородность снегонакопления на территории национального парка «Красноярские Столбы» за 2018–2023 гг. (точки отражают GPS-привязку снегомерной съемки).

покрова (50–70 см) и многоснежные (> 70 см), показала, что основу снежного покрова ООПТ к концу зимнего периода в 5 случаях из 6 (исключая 2021 г.) составили участки с ВСП 50–70 см, в то время как соотношение мало- и многоснежных участков по годам сильно изменялось (рис. 3).

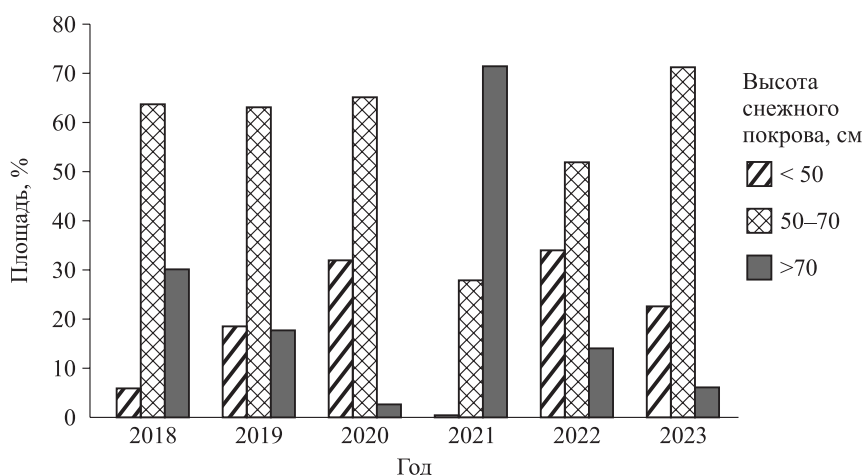
Кроме того, было выполнено ранжирование результатов снегомерной съемки по показате-

лю абсолютной высоты местности, результаты статистической обработки которого приведены в табл. 2.

Наибольшая ошибка среднего для участков с абсолютными отметками выше 700 м н. у. м. обусловлена меньшей частотой измерений в данной категории. Тем не менее в 6-летнем срезе ошибка средней высоты снега во всех рангах имеет близкие значения.

**Таблица 1.** Пространственно-временная динамика площадей с разной высотой снежного покрова на территории национального парка «Красноярские Столбы» за 2018–2023 гг.

Год	Распределение площадей (%) по высоте снежного покрова, см								
	< 30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80	80–90	90–100	> 100
2018	0.003		5.563	27.486	36.432	24.532	4.701	1.253	0.030
2019	0	0.820	17.830	36.690	26.640	16.060	1.910	0.050	0
2020	0.427	8.467	23.136	49.818	15.505	2.194	0.326	0.127	0
2021	0	0.004	0.288	5.172	22.524	22.792	25.117	12.041	12.062
2022	0.027	4.294	29.812	35.313	16.561	9.641	3.925	0.425	0.003
2023	0.042	3.250	19.350	48.447	22.862	5.234	0.760	0.052	0.004
<i>V, %</i>	203.69	99.27	69.17	48.43	32.54	68.81	154.55	205.70	244.05



**Рис. 3.** Соотношение площадей, относящихся к различным категориям ВСП по уровню снежности, за 2018–2023 гг.

Максимальные значения средней высоты снега по всем рангам абсолютных отметок ожидаемо зафиксированы зимой 2021 г., минимальные выявлены в разные годы: на участках с высотой местности до 400 м н. у. м. – в 2020 г., 400–500 м и 600–700 м н. у. м. – в 2022 г., 500–600 м и свыше 700 м н. у. м. – в 2023 г. Зимы 2018 и 2019 гг. продемонстрировали средний диапазон ВСП для всех рангов абсолютных отметок (не отмечено ни одного экстремума).

Изменение мощности снежного покрова (по осредненным за 6-летний период данным) с ростом абсолютной высоты местности на данной территории имело экспоненциальную зависимость (рис. 4).

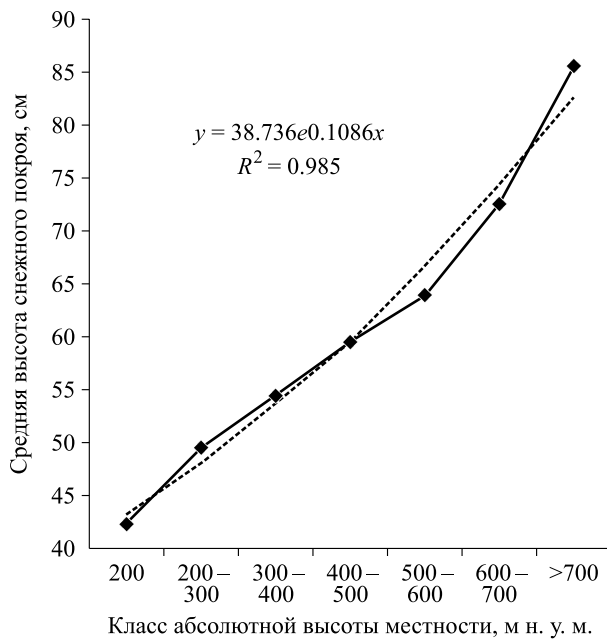
Увеличение интенсивности нарастания мощности снега на каждые 100 м высоты отмечалось с отметки около 500 м н. у. м.

Для 22 участков постоянной сети мониторинга на основании эмпирических данных о плотно-

**Таблица 2.** Средняя высота снежного покрова (с ошибкой среднего) по градиенту абсолютной высоты местности за 2018–2023 гг.

Год	Средняя высота снега (см) на участках с разной абсолютной высотой местности, м н. у. м.						
	< 200	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700	> 700
2018	47.33 ± 4.43	54.39 ± 1.16	61.54 ± 1.31	69.94 ± 1.73	69.84 ± 1.84	73.65 ± 2.87	87.14 ± 6.55
2019	42.00 ± 1.98	48.29 ± 0.71	52.22 ± 0.88	58.60 ± 1.29	61.37 ± 1.43	67.21 ± 1.80	81.33 ± 5.51
2020	<b>28.50 ± 1.07</b>	<b>39.37 ± 0.93</b>	<b>46.67 ± 0.89</b>	51.67 ± 1.16	57.72 ± 1.51	65.73 ± 1.95	86.29 ± 6.89
2021	<b>55.60 ± 1.96</b>	<b>65.64 ± 1.40</b>	<b>70.83 ± 1.04</b>	<b>75.53 ± 1.66</b>	<b>83.03 ± 2.72</b>	<b>95.93 ± 3.35</b>	<b>103.56 ± 11.48</b>
2022	37.38 ± 1.17	44.49 ± 1.00	48.22 ± 0.92	<b>51.00 ± 1.24</b>	57.97 ± 1.89	<b>65.07 ± 3.37</b>	79.71 ± 2.59
2023	43.50 ± 1.38	45.62 ± 1.57	48.04 ± 1.31	51.60 ± 1.74	<b>53.81 ± 1.73</b>	68.64 ± 2.83	<b>77.47 ± 2.65</b>
Итого	42.39 ± 3.73	49.63 ± 3.78	54.59 ± 3.93	59.72 ± 4.33	63.96 ± 4.41	72.71 ± 4.81	85.92 ± 3.85

Примечание. Полужирным курсивом выделены экстремумы.



**Рис. 4.** Распределение усредненных данных высоты снежного покрова за 2018–2023 гг. по классам абсолютной высоты местности.

1 – < 200 м; 2 – 200–300 м; 3 – 300–400 м; 4 – 400–500 м; 5 – 500–600 м; 6 – 600–700 м; 7 – > 700 м).

сти и высоте снега был рассчитан фактический его влагозапас. Высокий уровень прямой корреляции ( $r = 0.74–0.96$ ;  $p < 0.001$ ) между высотой и влагозапасом СП на контрольных участках дает

возможность оценить влагозапас для всех участков с известной высотой снега через применение регрессионного анализа (табл. 3).

Исходя из полученных результатов, наиболее достоверные расчетные значения влагозапаса СП получены за зимние периоды 2018 и 2022 гг.

Средняя ошибка аппроксимации ( $\bar{A}$ ), выходящая за пределы 10 %, может указывать на необходимость увеличения количества определений плотности снега при проведении дальнейших исследований. Тем не менее индекс детерминации  $R^2$  свидетельствует о правомерности использования приведенных линейных уравнений для расчета влагозапаса по данным о высоте снега. Статистические параметры полученных расчетных выборок влагозапаса СП по каждому зимнему периоду приведены в табл. 4.

Незначительные показатели коэффициента вариации ( $V$ ) и ошибки среднего ( $m$ ) подтверждают удовлетворительное качество полученных расчетных значений содержания воды в снеге. Сравнительный анализ расчетного влагозапаса с фактическими данными по количеству выпавших твердых осадков и количеству снежных дней за сезон не выявил статистически значимых связей ( $r = 0.43–0.33$ ;  $p < 0.005$  соответственно).

**Таблица 3.** Параметры регрессионного анализа зависимости влагозапаса в снеге от его высоты на территории национального парка за 2018–2023 гг.

Год	$n$	$h$ , см min–max	Уравнение линейной регрессии	$R^2$	$\bar{A}$ , %	$Z$ , $10^6 \text{ м}^3$	$Z_{\text{ср.вз}}$ , мм
2018	267	39–110	$y = 2.556x - 25.614$	0.92	7.84	66.7520	141.478
2019	389	30–95	$y = 2.1326x + 5.4468$	0.60	11.33	61.9258	131.249
2020	379	20–110	$y = 1.5385x + 17.241$	0.63	14.95	46.5935	98.753
2021	374	37–160	$y = 3.11x - 58.397$	0.83	13.49	89.6862	190.086
2022	324	25–105	$y = 2.191x - 7.9323$	0.93	6.37	53.9130	114.266
2023	316	15–118	$y = 1.8548x + 15.787$	0.87	15.57	56.3820	119.499

*Примечание.*  $n$  – число измерений;  $h$  – диапазон высот;  $R^2$  – индекс детерминации;  $\bar{A}$  – средняя ошибка аппроксимации;  $Z$  – суммарный влагозапас в снеге до начала снеготаяния;  $Z_{\text{ср.вз}}$  – средневзвешенный влагозапас в снеге.

**Таблица 4.** Статистические параметры полученных расчетных выборок влагозапаса СП (мм) на фоне данных по твердым осадкам за 2018–2023 гг.

Год	Влагозапас снега, мм			$SD$	$V$ , %	$n$	Количество твердых осадков, мм	Число дней с осадками
	min	max	$X_{\text{ср}} \pm m$					
2018	74	256	$139 \pm 2.13$	34.79	25.05	245	166.60	44
2019	69	206	$125 \pm 1.33$	26.20	20.88	367	165.70	35
2020	48	186	$95 \pm 1.14$	22.23	23.43	357	207.66	49
2021	57	439	$179 \pm 3.11$	60.16	33.65	352	211.00	53
2022	47	222	$107 \pm 1.74$	31.26	29.20	302	96.45	44
2023	44	201	$113 \pm 1.64$	29.20	25.78	294	84.95	46

*Примечание.*  $SD$  – стандартное отклонение;  $V$  – коэффициент вариации;  $n$  – объем выборки.



**Таблица 5.** Достоверность различий (по *t*-критерию Стьюдента) накопленного влагозапаса снега в биоклиматических поясах национального парка «Красноярские Столбы» за 2018–2023 гг.

Высота, м н. у. м.	Годы											
	2018		2019		2020		2021		2022		2023	
	$Z_{cp}$ , мм	$t$	$Z_{cp}$ , мм	$t$	$Z_{cp}$ , мм	$t$	$Z_{cp}$ , мм	$t$	$Z_{cp}$ , мм	$t$	$Z_{cp}$ , мм	$t$
< 500	130.37	6.55	117.78	8.77	86.53	11.30	160.06	11.13	95.70	9.11	104.97	7.27
> 500	160.30		142.60		112.65		243.98		131.05		130.33	

Таким образом, за проанализированный 6-летний период влагозапас снежного покрова, сформированный на территории национального парка к концу первой декады марта, изменялся в довольно широком диапазоне значений:  $\Delta Z 43.1 \cdot 10^6 \text{ м}^3$  или  $\Delta Z_{cp, в3} 91.34$  мм на единицу площади в жидком эквиваленте. Минимальная амплитуда влагозапаса СП наблюдалась между двумя первыми зимами в периоде (2018 и 2019 гг.) и двумя последними (2022 и 2023 гг.) ( $\Delta Z_{cp, в3} 10.23$  и  $5.23$  мм соответственно); более значительные расхождения выявлены между зимами 2019 и 2023 гг. ( $\Delta Z_{cp, в3} 11.75$  мм); 2020 и 2022 гг. ( $\Delta Z_{cp, в3} 15.52$  мм). Влагозапас СП зимних периодов 2020 и 2021 гг. отличается в 1.92 раза, 2021 и 2022 гг. – в 1.66 раз.

Для данной территории выявлена не только выраженная межгодичная динамика влагозапаса СП, но и неравномерное его распределение по биоклиматическим поясам (условная граница между поясами 500 м н. у. м), статистически достоверные различия между которыми наблюдались во всех рассматриваемых зимних периодах ( $t > 2.5758$  при уровне значимости  $p = 0.01$ ) (табл. 5).

Характерно, что максимальные расхождения в объеме накопленной снежной воды между поясами проявилась в годы с экстремальными значениями общего влагозапаса, а амплитуда колебаний среднего влагозапаса в горно-таежном поясе в 1.79 раза выше, нежели в поясе светлохвойных и смешанных лесов ООПТ.

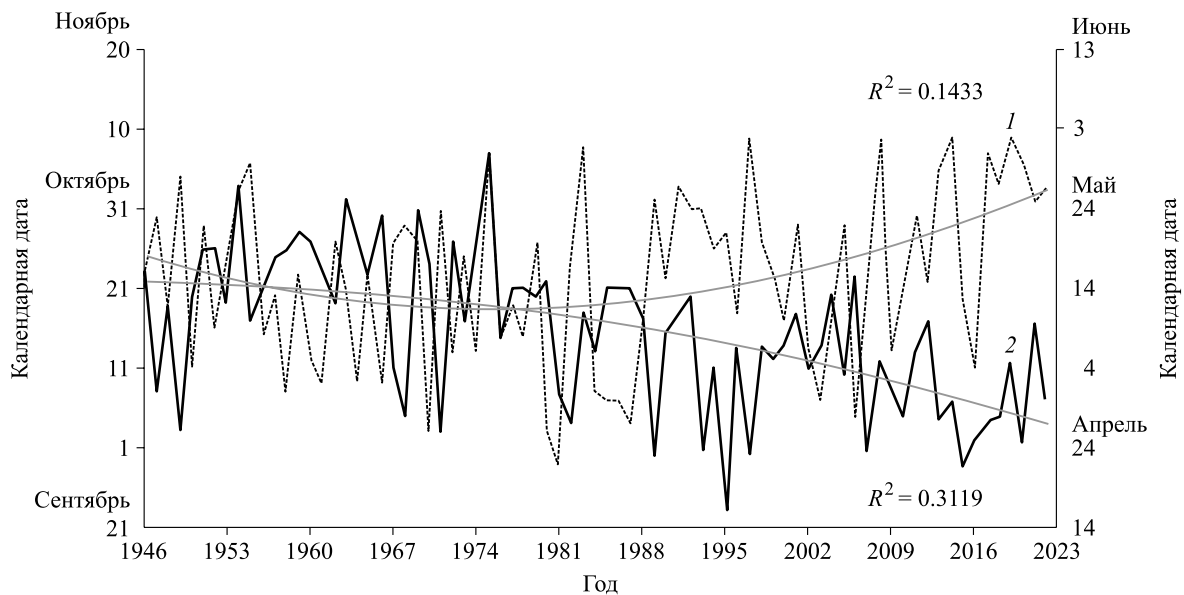
Существенная погодичная вариация линейных показателей снегонакопления (высота СП), расчетных показателей снежного влагозапаса ( $Z$ ), существенные расхождения значений последнего в экстремальные по погодным условиям годы в биоклиматических поясах ООПТ свидетельствуют о разной степени уязвимости экосистем таежного и подтаежного типа в условиях сильной межгодичной variability климата. Исходя из представленных результатов таежные экосистемы испытывают на себе более существенное трансформационное воз-

действие со стороны климатических факторов, особенно те, что находятся на контакте с подтайгой.

Полученные для территории национального парка «Красноярские Столбы» расчетные значения влагозапаса СП вполне сопоставимы с данными других авторов, работавших на территории Красноярского края (Буренина и др., 2013), с соответствующей поправкой на высоту снежного покрова. Кроме того, полученные результаты сверялись с данными Росгидромета по стране в целом и по двум квазиоднородным климатическим регионам (VI – Центр и юг Восточной Сибири; VIII – Алтай и Саяны), на границе которых расположена территория национального парка (Доклад..., 2019–2023). Особого внимания заслуживают годы, наиболее контрастные по итоговому влагозапасу СП.

Так, продолжительность залегания снежного покрова зимой 2019/20 г. в среднем по России оказалась значительно меньше климатической нормы, а аномалия продолжительности залегания снежного покрова на территории Алтая и Саян попала в десятку наибольших отрицательных значений (Доклад..., 2021). Кроме того, в целом для страны запас воды в снеге на лесном маршруте оказался ниже климатической нормы. На региональном уровне положительная аномалия по влагозапасу в лесу сформирована максимальным запасом воды в снеге лесных угодий Алтайского края, значительно превысившим норму зимой 2019/20 г. и нивелировавшим локальные отклонения противоположной направленности, характерные для территории национального парка.

Зимой 2020/21 г. на территории Алтая и Саян, как и в среднем по стране, максимальная высота снежного покрова оказалась значительно выше климатической нормы и попала в десятку наибольших значений в ранжированном ряду (за 1967–2021 гг.). Кроме того, для гор Южной Сибири отмечены положительные аномалии запаса воды в снеге как на открытых пространствах, так и под лесом (Доклад..., 2022).



**Рис. 5.** Сроки установления (1) и полного схода (2) устойчивого снежного покрова на мониторинговой площадке метеостанции «Столбы» за 1946–2022 гг. Аппроксимирование полиномом 2-й степени с уровнем достоверности аппроксимации ( $R^2$ ).

Таким образом, полученные нами результаты не противоречат общим климатическим трендам рассмотренных зимних периодов. Удовлетворительность результатов статистического анализа расчетных значений влагозапаса СП свидетельствует о правомочности дальнейшего применения использованного нами комбинированного подхода для определения данного показателя в более длительной перспективе и возможности поиска основных факторов, обуславливающих его изменчивость.

Влагозапас снежного покрова, безусловно, является интегральной комплексной величиной сопряженного влияния большого числа метеорологических условий, включая осадки зимнего периода (их общее количество, обилие и характер распределения внутри сезона), температурный режим (ход температур и экстремумы) и ветровую нагрузку. Анализ связей влагозапаса снега с конкретными метеопараметрами является предметом отдельных изысканий. В контексте настоящего исследования уместно сопоставить полученные результаты с общей продолжительностью залегания устойчивого снежного покрова на данной территории.

В течение рассматриваемого нами периода (зимы 2018–2023 гг.) установление постоянного снежного покрова в верхнем поясе национального парка неизменно происходило в первой декаде ноября, а сход его колебался в интервале с 25 апреля по 10 мая. Таким образом, средняя за 6 лет продолжительность залегания устойчи-

вого снежного покрова в горно-таежном поясе составила 178 дней, а в нижнем поясе – 156 дней, что заметно ниже многолетней нормы (200 дней к началу XX в.). Тенденция на сокращение периода снегонакопления отражает многолетний характер изменений в сроках установления и схода снежного покрова (рис. 5).

Указанные сдвиги в формировании и разрушении устойчивого снежного покрова являются естественным откликом на существенное потепление весеннего и осеннего периода, удлинения сезона с положительными температурами воздуха. Эти тенденции не могли не отразиться на общем снегонакоплении на разных высотно-поясных уровнях национального парка. Сравнительный анализ снегонакопления по усредненным данным высоты СП для нижнего пояса национального парка и возвышенной центральной его части до 1980-х годов и после показал существенное снижение ВСП, наиболее выраженное в нижнем поясе (Кнорре и др., 2023). Однако высота снега – это лишь один из критериев, определяющих его влагозапас, не менее важна плотность снега. Показатель влагозапаса как функция двух указанных факторов наибольшую нестабильность демонстрирует в верхнем поясе национального парка, особенно на контакте двух биоклиматических поясов.

В условиях современных климатических изменений особенности снегонакопления в горных экосистемах играют существенную роль в формировании почвенной влаги, использу-

мой в начале вегетации. Многолетняя практика возделывания сельскохозяйственных культур в засушливых регионах нашей страны свидетельствует о том, что запас продуктивной влаги в почве формируется именно в зимний период, а ирригационные приемы не дают такого положительного эффекта, как снегонакопление (Гусев, 1992).

По аналогии можно предположить, что и в лесных сообществах водный стресс, обусловленный недостатком продуктивной влаги в весенний период, не будет компенсироваться в полной мере поступлением атмосферных осадков в течение теплого времени года. Возможно, по этой причине оценка происходящих в лесных экосистемах изменений с помощью общепринятых индексов увлажнения или сухости не дает желаемой ясности.

Изучение влияния процессов формирования продуктивной почвенной влаги в лесных экосистемах на их устойчивость к происходящим климатическим изменениям, на устойчивость конкретных лесообразующих пород, на наш взгляд, является одним из актуальных и перспективных направлений.

Безусловно, важное влияние на формировании почвенного влагозапаса весной, кроме влагозапаса в снеге, будет оказывать и характер снеготаяния, который определяется интенсивностью нарастания положительных температур воздуха, глубиной и степенью промерзания почвогрунтов, количеством и обилием дождей в период схода снега. Тем не менее влагозапас снежного покрова является ключевым фактором формирования продуктивной почвенной влаги в умеренных широтах, во многом определяющим вегетацию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка влагозапаса снежного покрова в национальном парке «Красноярские Столбы» за 2018–2023 гг. с использованием данных снегомерной съемки и методов современного картографирования. Получены статистически достоверные данные по показателям снегонакопления на разных орографических уровнях. Показано сокращение продолжительности залегания снежного покрова за период наблюдений более 70 лет.

Полученные результаты дают возможность проведения в дальнейшем более подробного анализа по 1) определению зон наибольшей уязвимости растительного покрова из-за дефицита

почвенного влагозапаса в начале вегетационного периода; 2) оценке влияния влагозапаса СП на формирование объема весеннего половодья в водотоках национального парка и принимающих их водных объектах; 3) определению количественных параметров поступления поллютантов в составе снежных осадков на территорию национального парка как части балансового уравнения в круговороте элементов на данной территории.

Расчет влагозапаса в разных единицах измерения позволяет в дальнейшем легко использовать эти данные для решения различных задач. Так, средневзвешенный показатель влагозапаса СП очень удобно сравнивать с количеством атмосферных осадков, а суммарный показатель – использовать в водно-балансовых расчетах.

Представленные в статье данные о высокой варибельности показателей снегонакопления ( $ВСП$ ,  $Z_{ср}$ ), наиболее существенно отражающих особенности современного изменения климата, свидетельствуют о различной уязвимости лесных экосистем национального парка на разных орографических уровнях. Горная тайга ООПТ более уязвима к происходящим изменениям среды, нежели подтаежные комплексы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке АО «РУСАЛ Красноярск» (договор № 29.03.02/2022 от 01.03.2022) по проекту «Мониторинг антропогенного (техногенного) воздействия на лесные экосистемы национального парка «Красноярские Столбы».*

*Авторы выражают глубокую признательность государственным инспекторам отдела охраны заповедной территории национального парка «Красноярские Столбы» за существенный вклад в осуществление ежегодных снегомерных работ.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Е. Б., Тупицына Н. Н. Флора заповедника «Столбы». Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 304 с.
- Буренина Т. А., Шишкин А. С., Онучин А. А. Снежный покров на вырубках разных лет в пихтово-кедровых лесах Енисейского кряжа // Лесоведение. 2013. № 6. С. 26–36.
- Буторина Т. Н. К характеристике лесорастительных условий государственного заповедника «Столбы» // Тр. гос. заповед. «Столбы». Красноярск, 1961. Вып. 3. С. 247–282.
- Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 182 с.

- Григорьев В. Ю., Телегина А. А. Влагозапас снежного покрова Европейской части России по данным спутниковой гравиметрии // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года», Петрозаводск, 6–11 июля 2015 г. Т. 2. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2015. С. 122–128.
- Гончарова Н. В., Кнорре А. А. Основные тенденции изменений климата в заповеднике «Столбы» по данным собственной метеостанции за непрерывный период наблюдений 1947–2016 гг. // Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. Вып. 8. С. 15–19.
- Гусев Е. М. Формирование режима и ресурсов почвенных вод в зимне-весенний период: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.03. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 1992. 42 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет, 2019. 79 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: Росгидромет, 2020. 97 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.: Росгидромет, 2022. 104 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Росгидромет, 2023. 104 с.
- Кнорре А. А., Разнобарский В. Г., Вагнорюс П. А., Шайдуров Р. Л., Лесников Е. М., Астапенко С. А., Акулов Е. Н. Угроза исчезновения пихтовых древостоев в результате инвазии полиграфа уссурийского (*Polygraphus proximus* Blandf.) в заповеднике «Столбы» // Тр. гос. заповед. «Столбы». Вып. 20. Красноярск, 2015. С. 211–221.
- Кнорре А. А., Гончарова Н. В., Ерунова М. Г. Динамика снежного покрова в национальном парке «Красноярские Столбы» за период 1950–2020 // Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2021. Вып. 10. С. 50–55.
- Кнорре А. А., Целихин М. К., Щербаков В. М. Особенности формирования снежного покрова в горных условиях национального парка «Красноярские Столбы» за период 1946–2020 // Мониторинг состояния природных комплексов и многолетние исследования на особо охраняемых природных территориях: Сб. науч. тр. Шушенское: Саяно-Шуш. биосфер. заповед., 2023. С. 8–11.
- Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1988. 239 с.
- Назимова Д. И., Первунин В. А., Тростина Е. Ф., Ерунова М. Г. Ландшафтно-лесотипологическая структура заповедника // Тр. гос. заповед. «Столбы». Красноярск, 2010. Вып. 19. С. 16–38.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеоздат, 1969. Вып. 3. Ч. I. 201 с.
- Онучин А. А., Буренина Т. А. Географический детерминизм – ключ к пониманию причин противоречий в оценке гидрологических функций лесов // Сб. науч. тр. гос. Никит. бот. сада. 2018. Т. 147. С. 11–13.
- Онучин А. А., Данилова И. В. Орографические эффекты распределения атмосферных осадков на юге Приенисейской Сибири // Геогр. и природ. ресурсы. 2012. № 3. С. 85–92.
- Онучин А. А., Данилова И. В. Способ определения количества и характера пространственного распределения твердых атмосферных осадков. Патент РФ на изобр. RU 2 617 452 С2. М.: Роспатент, 2017. 8 с.
- Онучин А. А., Протопопов В. В. Способ определения снегозапасов на водосборных бассейнах в темнохвойных лесах. Авт. свид-во на изобр. SU 1130260 А1. М.: Гос. ком. по изобр. и откр. при ГКНТ СССР, 1984. 2 с.
- Паромов В. В., Земцов В. А., Копысов С. Г. Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 62–74.
- Парфенова Е. И., Чебакова Н. М., Власенко В. И. Зависимости биоразнообразия растительного покрова разных уровней организации от климатических факторов (на примере Средней Сибири) // Сиб. экол. журн. 2004. Т. 11. № 5. С. 725–734.
- Пахарькова Н. В., Михальчук Я. П. Влияние температурного фактора на активность фотосинтетического аппарата пихты сибирской и ели сибирской во время осенней фотопериодической реакции // Тр. гос. заповед. «Столбы». Вып. 20. Красноярск, 2015. С. 148–153.
- Проект организации и ведения лесного хозяйства государственного учреждения государственной природный заповедник «Столбы»: Поясн. зап. Красноярск, 2007. Т. 1 Кн. 1. 337 с.
- Протопопов В. В., Онучин А. А. Способ определения снегозапасов в лесных массивах. Авт. свид-во на изобр. SU 1720575 А1. М.: Гос. ком. по изобр. и открыт. при ГКНТ СССР, 1992. 3 с.
- Тихонова И. В., Корец М. А. Изменчивость метеорологических условий произрастания хвойных пород в Средней Сибири с 1960 г. // Лесоведение. 2021. № 2. С. 173–186.
- Тростина Е. Ф., Кнорре А. А. Результаты мониторинга загрязнения снежного покрова заповедника «Столбы» и города Красноярска за период 2011–2018 гг. // Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. Вып. 9. С. 47–62.
- Харук В. И., Шушпанов А. С., Петров И. А., Демидко Д. А., Им С. Т., Кнорре А. А. Усыхание *Abies sibirica* Ledeb. в горных лесах Восточного Саяна // Сиб. экол. журн. 2019. Т. 26. № 4. С. 369–382.
- Чебакова Н. М., Парфенова Е. И. Прогноз продвижения границ леса при изменении климата к концу 20 века в Средней Сибири // Вычисл. технол. 2006. Т. 11. Ч. 3. Спец. выпуск. С. 77–86.
- Шайдуров Р. Л., Вединистов Р. В., Сахарков Ю. А., Инюшкин С. В., Голубев Д., Кнорре А. А., Ерунова М. Г. Лесопатологический мониторинг // Летопись природы ГПЗ «Столбы» за 2019 год. Кн. 77. Т. 1. С. 87–92.
- Kharuk V. I., Shushpanov A. S., Petrov I. A., Demidko D. A., Im S. T., Knorre A. A. Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) morta-

lity in mountain forests of the Eastern Sayan Ridge, Siberia // *Contemp. Probl. Ecol.* 2019. V. 12. N. 4. P. 299–309 (Original Rus. text © 2019, V. I. Kharuk, A. S. Shushpanov, I. A. Petrov, D. A. Demidko, S. T. Im, A. A. Knorre, publ. in *Sib. ekol. zhurn.* 2019. V. 26. N. 4. P. 369–382).

*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 number 1378. 19 p.

## VARIABILITY OF SNOW COVER MOISTURE RESERVE IN THE FOOTHILLS OF THE EASTERN SAYAN WITH THE BACKGROUND OF CLIMATE SHIFTS

**E. F. Tropina<sup>1</sup>, A. A. Knorre<sup>1,2</sup>, M. G. Erunova<sup>1,3</sup>, M. K. Tselikhin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *National Park Krasnoyarsk Stolby  
Kar`ernaya str., 26a, Krasnoyarsk, 660006 Russian Federation*

<sup>2</sup> *Siberian Federal University  
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation*

<sup>3</sup> *Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

---

E-mail: tropina-soil@yandex.ru, nau-stolby@yandex.ru, marina@icm.krasn.ru, big.mikle@mail.ru

Long-term data on variations in snow cover parameters in the subtaiga and mountain-taiga group of forests in the protected area of the National Park Krasnoyarsk Stolby are presented. A significant reduction in the period of occurrence of stable snow cover (~ 20 days) was revealed due to later snow formation and earlier melting. To evaluate the water storage in snow, we use the thickness of the snow cover ( $r = 0.74–0.96$ ;  $p < 0.001$ ) in specific conditions for period 2018–2023. According of our estimation the territory with snow depths in the intervals of 50–70 cm ( $V, \% < 50$ ) is identified as a most stable areas (from 52 to 71 % of all protected area) in different years, except for 2021 yrs. (only 28 % of the territory) with the critically low amount of the snow. The total amount of the water storage in snow at the beginning of snowmelt, depending on the weather conditions of a different years, varied from 46.6 to  $89.7 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> with an average weighted water storage per unit area from 98.8 to 190.1 mm. The presented data are comparable with those previously published for other territories of the Krasnoyarsk region (Burenina et al., 2013) and Siberia (Report..., 2019–2023), which makes it possible to further in-depth analysis of the relationship between evaluated data on water storage in snow and climatic parameters of the environment in longer time scale.

**Keywords:** *water storage in snow cover, bioclimatic zones, climate change, winter period, GIS technologies, National Park Krasnoyarsk Stolby.*

**How to cite:** *Tropina E. F., Knorre A. A., Erunova M. G., Tselikhin M. K.* Variability of snow cover moisture reserve in the foothills of the Eastern Sayan with the background of climate shifts // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 4. P. 48–60 (in Russian with English abstract and references).