

На правах рукописи



Крючков Андрей Дмитриевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА
НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ**

Специальность: 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Пермь – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель: **Калинин Николай Александрович**, доктор географических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шерстюков Борис Георгиевич**, доктор географических наук, заведующий лабораторией исследования последствий изменения климата Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации-Мирового центра данных (г. Обнинск)

Носырева Ольга Владимировна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры метеорологии и климатологии Национального исследовательского Томского государственного университета (г. Томск)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18 (г. Казань)

Защита состоится 24 декабря 2021 г. в 13.30 на заседании диссертационного совета Д 212.189.10 при ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, email: meteo@psu.ru, факс (342)239-63-54.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научной библиотеки Пермского государственного национального исследовательского университета.

Электронная версия текста диссертации и автореферата доступна на сайте ПГНИУ по адресу: <http://www.psu.ru> и официальном сайте ВАК РФ.

Ваш отзыв об автореферате просим направить по адресу: 614990, г. Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15, ПГНИУ, диссертационный совет Д 212.189.10. Ученому секретарю Балиной Т.А., e-mail: t_balina@mail.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук,
доцент



Татьяна Анатольевна Балина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Снежный покров является одной из важных климатических характеристик и оказывает существенное влияние на окружающую среду, в частности, на радиационный и термический режимы воздуха и почвы, направление и скорость ветра, рельеф подстилающей поверхности, речной сток, миграцию животных, а также сферы деятельности человека, такие как строительство, транспорт, жилищно-коммунальное и сельское хозяйство.

В Пермском крае залегание снежного покрова наблюдается на протяжении 6–8 месяцев, при этом территория региона отличается сложным рельефом, густой развитой речной сетью, разнообразием форм растительности, но в то же время редкой и неравномерно распределенной сетью наблюдений.

Особенности физико-географического положения региона накладываются на существующие климатические изменения, что в свою очередь оказывает влияние на условия формирования и распределения снежного покрова, а также динамику его характеристик. Потребность в получении таких знаний для возможности обеспечения эффективной работы всех отраслей деятельности человека, например, для обслуживания транспортной системы или решения вопросов внутреннего туризма, с каждым годом только растет, что подтверждает актуальность выбранной темы.

Цель работы: выявление закономерностей распределения характеристик снежного покрова в пространстве и во времени с учетом циркуляционных особенностей атмосферных процессов и физико-географических условий территории Пермского края.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать и выявить основные факторы, влияющие на распределение характеристик снежного покрова по территории Пермского края и их изменение во времени.
2. Произвести подбор и восстановление рядов данных основных характеристик снежного покрова в рамках исследуемого периода.
3. Изучить особенности пространственного распределения продолжительности залегания снежного покрова.
4. Исследовать пространственно-временную изменчивость высоты снежного покрова и запасов воды в нем.
5. Оценить возможность использования альтернативных источников информации о снежном покрове, таких как реанализ, с учетом физико-географических особенностей рассматриваемой территории.

Материалами для исследования послужили:

1. Метеорологические ежегодники и ежемесячники за 1960–2020 гг., предоставленные Пермским ЦГМС – Филиалом ФГБУ «Уральское» УГМС.

2. Архив данных наблюдений, сформированный Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД) за 1970–2020 гг.

3. Синоптические бюллетени за 1998–2018 гг., предоставленные Гидрометцентром РФ.

4. Данные о среднемесячной высоте снежного покрова, извлеченные из массивов данных глобальных атмосферных реанализов ERA-Interim и ERA 5-Land Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) за 1990–2020 гг.

5. Результаты снегомерных съемок, которые проводились при участии автора в окрестностях г. Перми с 2018 по 2021 гг.

Для решения поставленных задач в работе применялись следующие **методы**:

восстановление пропусков и увеличение временных рядов наблюдений по пунктам-аналогам путем использования линейной регрессии между рассматриваемыми рядами;

оценка однородности многолетних рядов характеристик снежного покрова с помощью комбинированного подхода на основе тестов Александерсона, Фон-Ноймана, Петита и Буишанда;

сплайн-интерполяция в программном комплексе ArcMap для пространственного анализа исследуемых параметров;

определение основных характеристик снежного покрова на отдельных элементах ландшафта в рамках маршрутных измерений.

Научная новизна работы заключается в том, что **впервые**:

1. Для Пермского края всесторонне и комплексно рассмотрены такие факторы, как циркуляционные условия и температурный режим атмосферы, режим ветра и осадков, рельеф, антропогенное влияние, а также взаимосвязи между ними и степень воздействия этих факторов на пространственно-временное распределение характеристик снежного покрова.

2. Изучены условия формирования и изменения как устойчивого, так и временного снежного покрова во втором десятилетии XXI века.

3. В результате привлечения различных источников информации обновлены сведения о продолжительности залегания снежного покрова, датах установления и разрушения устойчивого снежного покрова в Пермском крае.

4. Для Пермского края проведено сравнение данных о высоте снега по результатам наблюдений на стационарных участках и маршрутах, уточнена ранее полученная информация о высоте снежного покрова и запасах воды в нем.

5. Произведена оценка возможности использования данных реанализа ERA5-Land при исследовании параметров снега на региональном уровне и выявлены основные особенности сопоставления показателей реанализа и фактических данных с учетом физико-географических условий территории Пермского края.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования. Получили дальнейшее развитие существующие теоретические по-

ложения о причинно-следственном характере взаимосвязи климатообразующих факторов и параметров снежного покрова путем изучения региональных особенностей распределения характеристик снега. Показана необходимость и оценена возможность использования альтернативных источников гидрометеорологической информации при исследовании снежного покрова, в частности, реанализов.

Практическая значимость работы. Результаты исследования могут быть полезны при подготовке справочно-климатической информации для организаций, осуществляющих свою деятельность в сфере ЖКХ, сельского хозяйства, строительства, транспорта. Сформированные ряды данных проверены на наличие пропусков и ошибок, а также на однородность и могут быть использованы для исследовательских работ, в том числе при гидрологических изысканиях на территории Пермского края. Материалы исследования используются в программах дисциплин «Методы и средства метеорологических измерений», «Зимняя метеорологическая практика» на кафедре метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета.

Апробация работы. Основные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, были представлены на следующих конференциях:

1. Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», г. Иркутск, 21–23 марта 2018 г.

2. Международная научно-практическая конференция «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы», г. Воронеж, 3–5 октября 2019 г.

3. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Цифровая география», г. Пермь, 16–18 сентября 2020 г.

4. Всероссийская научно-практическая конференция «Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов», г. Екатеринбург, 22–24 апреля 2021 г.

5. Международная конференция и Школа молодых ученых «Климатические риски и космическая погода», г. Иркутск, 14–17 июня 2021 г.

Результаты, полученные в диссертации, использовались при выполнении НИР, финансируемой РФФИ (проект 19-45-590021 p_a) «Условия образования опасных явлений погоды на Урале, зависящих от фазового состояния осадков».

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Все анализируемые результаты работы получены автором лично или под его руководством. В частности, осуществлены организация и проведение экспедиционных исследований, сбор данных о снежном покрове на территории Пермского края за второе десятилетие XXI века, контроль качества, исправление найденных в существующих архивах и документах ошибок, восстановление отсутствующей информации. Автором

проведены извлечение и обработка данных из массивов реанализов ECMWF с последующей интерпретацией результатов применимо к территории Пермского края. Подготовка к печати научных работ, отражающих результаты исследований, осуществлялась как самостоятельно, так и при участии соавторов.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Особенности атмосферной циркуляции и температурно-влажностного режима являются основополагающими факторами при формировании, а рельефа и растительности – при распределении снежного покрова в Пермском крае.

Для оценки макропроцессов, оказывающих влияние на территорию Пермского края, использовались данные о формах циркуляции Г.Я. Вангенгейма – А.А. Гирса.

В первой половине холодного периода на территории Пермского края наблюдается активная циклоническая деятельность, что приводит к более частому выпадению осадков. Постепенно температурный контраст между атлантическим и континентальным воздухом выравнивается, циклоническая деятельность ослабевает. Западный перенос все чаще прерывается восточной формой циркуляции с ультраполярными вторжениями и выходами южных циклонов. Особенно неустойчивость синоптических процессов с изменчивой погодой проявляется на территории Прикамья в весенние месяцы.

Межгодовая изменчивость выражается в заметном увеличении повторяемости западной и меридиональной, а также уменьшении восточной форм циркуляции в 80–90-е гг. XX века (рис. 1).

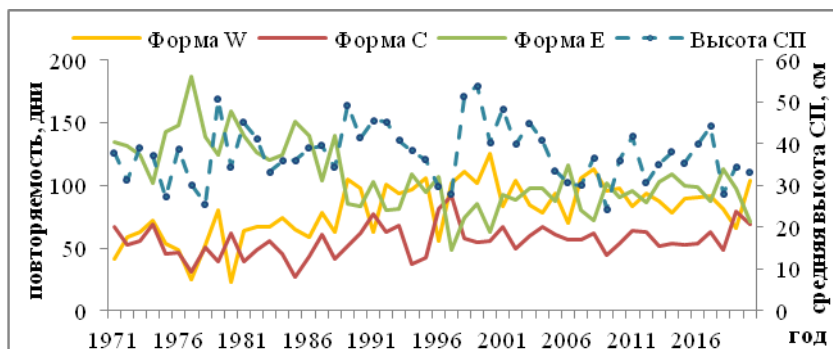


Рис. 1. Сопоставление повторяемости форм циркуляции Вангенгейма–Гирса и средней высоты снежного покрова в Пермском крае (1970–2020 гг.).

Это привело к росту числа теплых, насыщенных влагой атлантических циклонов, наблюдавшихся над Пермским краем. Преобразование процессов формы W в процессы формы С в 90% случаев способствовали формированию

отрицательного теплового баланса подстилающей поверхности, в условиях которого появляется и формируется снежный покров.

В начале XXI века тенденции в развитии атмосферной циркуляции сменились на противоположные, но имели меньшую интенсивностью. На фоне продолжающегося, хотя и замедлившегося, роста температуры воздуха уменьшение количества осадков привело к существенному снижению показателей снежного покрова.

Между межгодовой повторяемостью форм W и E и изменчивостью высоты СП (рис. 1) прослеживается слабая связь, в первом случае отмечена прямая зависимость (коэффициент корреляции составил 0,27), во втором – обратная (–0,23). Связи между высотой СП и формой С не обнаружено, коэффициент корреляции между двумя характеристиками составил 0,01.

Большая пространственная протяженность территории Пермского края, наличие на Востоке региона Уральских гор (рис. 2) и предшествующего им краевого предгорного прогиба, в котором расположены широкие долины крупных рек, а также Камское водохранилище, приводят к формированию значительной контрастности рельефа. В связи с этим возникают региональные и локальные особенности температурного, ветрового и влажностного режимов.

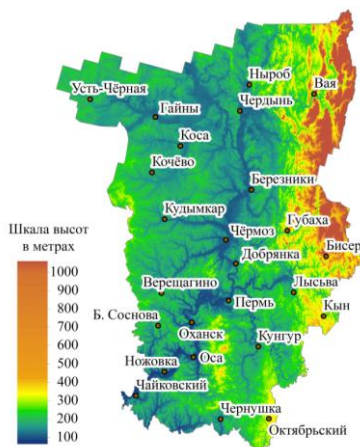


Рис. 2. Карта расположения метеорологических станций на территории Пермского края с учетом рельефа.

Переход среднесуточной температуры воздуха через 0°C происходит в октябре, при этом разница в датах перехода между северными и южными районами в среднем составляет 10–15 дней, в горах – 5 дней. Весной даты перехода через 0°C приходятся на апрель.

В холодный период происходит уменьшение градиентов широтного изменения температуры воздуха. Из-за влияния Уральских гор температура воздуха понижается преимущественно с запада на восток. В это время в северной

части края преобладают южные и юго-восточные ветры с вероятностью повторений до 48%. На востоке господствуют юго-западные и западные, на остальной территории – южные и юго-западные ветры с повторяемостью до 60%.

Наблюдения за характеристиками снега в Пермском крае проводятся на 25 метеорологических станциях, поэтому важным критерием при исследовании снега является их физико-географическое положение. К равнинной территории Пермского края относится 21 наблюдательное подразделение, причем 9 из них расположены вблизи р. Камы (рис. 2), к горной – 4.

Зависимость между абсолютной высотой метеорологических станций и характеристиками (средней и максимальной высотами) снежного покрова представлена на рис. 3. Наибольшие величины снежного покрова отмечаются на станциях преимущественно со средней по краю высотой над уровнем моря. Немаловажную роль в данном случае играет положение станций относительно широты, т.е. северные подразделения отличаются большей высотой СП, чем южные.

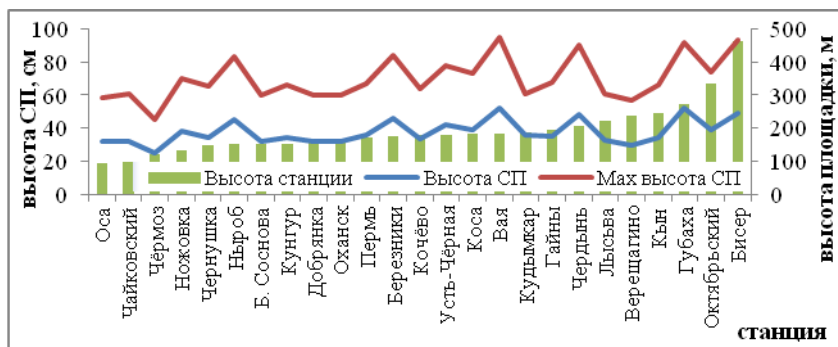


Рис. 3. Зависимость средней и максимальной высоты снежного покрова от высоты метеорологической станции (1970–2020 гг.).

Особенности рельефа оказывают влияние на распределение осадков. По разным данным в Пермском крае зависимость сумм осадков от высоты местности выражается в увеличении количества осадков на 10–20% на каждые 100 м подъема. Использование этой градации применимо к высоте СП на метеорологических станциях Пермского края (рис. 4) показало, что показатели 56% наблюдательных подразделений соответствуют указанному диапазону.

Следовательно, для этих станций при распределении снежного покрова основополагающим фактором является влияние рельефа на количество выпадающих осадков. Для 6 подразделений, преимущественно северных, поправочный коэффициент должен быть меньше 10%, для Чермоза и Верецагино – больше 20%. В первом случае сказывается влияние широтного распределения снежного покрова, во втором – метелевого переноса на обширных открытых пространствах. На станциях Вая и Губаха градация не работает из-за местных особенностей.

К таким особенностям можно отнести экспозицию и уклон склонов, а также наличие растительности на окружающей территории.

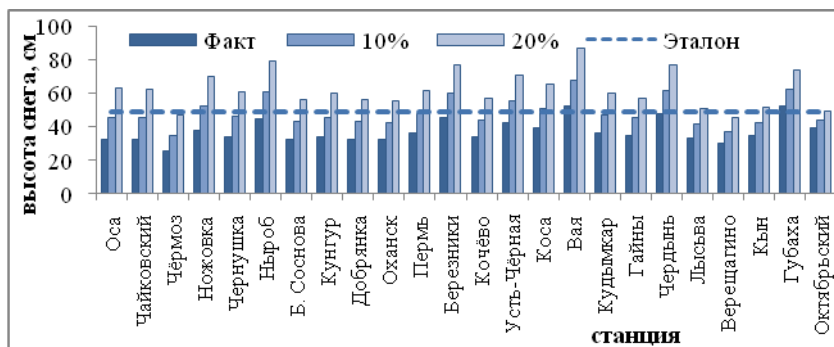


Рис. 4. Фактическая и приведенные на основе поправок к эталонной средние высоты СП на метеорологических станциях Пермского края.

Пермский край отличается развитой речной и овражно-балочной сетью, а также 70% покрытием территории лесами.

Исследования показали, что характеристики снежного покрова в понижениях могут достигать 130% от величин на ровных участках. Однако наличие на склонах балок растительности приводит к уменьшению данной величины на 10–15%. В то же время изменчивость влагозапасов в снеге в балках, покрытой растительностью, больше, чем в открытых понижениях.

Высота снега на двух противоположных склонах в зависимости от угла их наклона и положению по отношению к солнцу и ветрам может отличаться более чем в 1,5 раза, а в период активного снеготаяния – на порядок.

Разница высоты СП между открытыми и залесенными участками в 50% случаев превышает в среднем 5, а в некоторых случаях и 10 см. Вклад переходных зон между полем и лесом при перпендикулярном или близком к нему положении по отношению к господствующему направлению ветра в снегонакопление достигает 10–15%.

2. В Пермском крае за последние 30 лет наблюдается тенденция к уменьшению продолжительности залегания устойчивого снежного покрова со сдвигом периода его существования на более поздние сроки.

Средняя продолжительность залегания устойчивого снежного покрова (УСП) в Пермском крае составляет 169 дней, значения изменяются от 153 дней на юго-западе до 193 дней на севере-востоке края.

При подробном рассмотрении ежегодной изменчивости дат образования УСП (рис. 5а) видно, что до 80-х гг. прошлого века имелась тенденция к более раннему образованию устойчивого снежного покрова на фоне преобладания восточной формы циркуляции в совокупности со снижением среднемесячной температуры воздуха. Так в 60-е гг. установление УСП происходило в среднем 2 ноября, а в 70-е – 27 октября.

Впоследствии произошла смена существующей тенденции на обратную, которая сохранялась до конца первого десятилетия XXI в. В этот период на фоне увеличения повторяемости западной формы циркуляции и роста температуры воздуха средняя дата образования устойчивого снежного покрова приходилась на 7 ноября. Промежуток 2010–2019 гг. снова характеризуется тенденцией к более раннему образованию УСП, однако в последние четыре года, включая осень 2020 г., устойчивый снежный покров формировался в среднем по краю позднее 1 ноября.

Устойчивость снежного покрова нарушается в пределах с 6 апреля по 06 мая, что показано на рис. 5б. Как можно заметить, до 80-х гг. XX в. наблюдалась тенденция к более раннему разрушению УСП: оно наступало в среднем по краю 17 апреля.

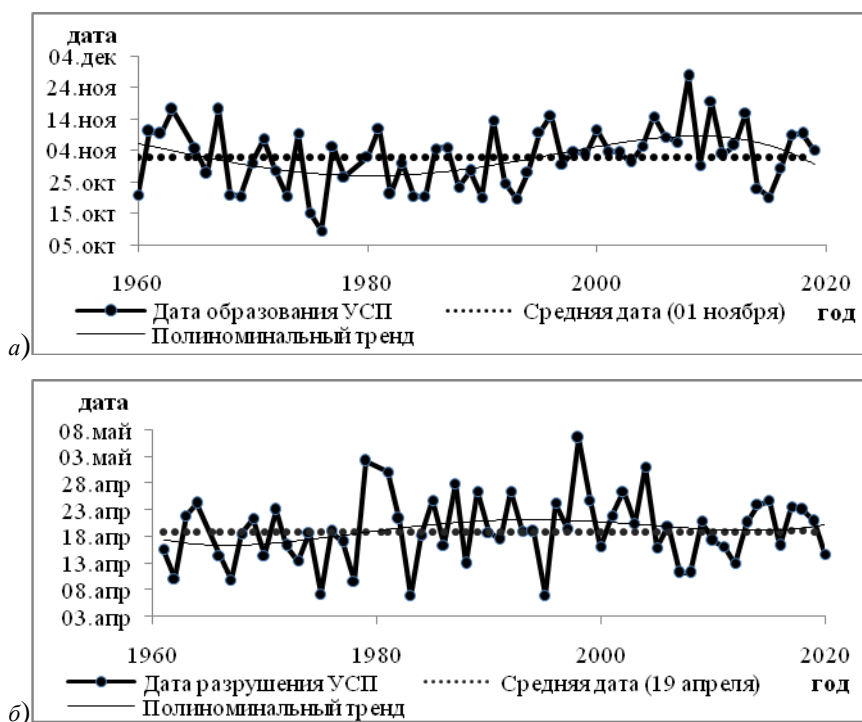


Рис. 5. Средние по Пермскому краю даты установления (а) и разрушения (б) устойчивого снежного покрова (1961–2020 гг.).

С 80-х до конца 90-х гг. сохранялась тенденция к более поздней деформации устойчивого снежного покрова (20 и 21 апреля соответственно). Начало XXI в. характеризуется тенденцией к более раннему разрушению, однако во

второе десятилетие она сменилась на обратную, при этом в среднем в оба временных промежутка устойчивый снежный покров разрушался 19 апреля.

Если рассматривать межгодовую изменчивость продолжительности залегания УСП (рис. 6), то с начала 60-х и до конца 80-х гг. XX в. наблюдалась тенденция к ее увеличению. Среднее количество дней с устойчивым снежным покровом в первое десятилетие составило 167 дней, в следующий период 173 дня.

В 80-е гг. наблюдается замедление роста. В этот временной промежуток число дней с восточной циркуляцией пошло на убыль, а западная и меридиональная формы, наоборот, стали повторяться чаще. В среднем по краю в данное десятилетие продолжительность залегания УСП составила 174 дня, что является максимальным значением за весь исследуемый период.

Четвертое из рассматриваемых десятилетий характеризуется уменьшением продолжительности залегания устойчивого снежного покрова, хотя к концу 90-х гг. интенсивность изменений несколько снизилась. В среднем продолжительность залегания УСП составила 172 дня.



Рис. 6. Межгодовая изменчивость средней продолжительности залегания устойчивого снежного покрова в Пермском крае (1960–2020 гг.).

Начало 20 века выделяется на фоне других десятилетий минимальным средним значением количества дней с УСП – 164. Все станции Пермского края зафиксировали уменьшение числа дней с устойчивым снежным покровом в пределах от 3 (Б. Соснова) до 17 единиц (Гайны).

На протяжении 4 сезонов число дней с УСП было меньше 160, при том ранее и позднее подобной ситуации в период 1960–2020 гг. не наблюдалось. В текущем десятилетии наблюдалось резкое сокращение числа дней с циклонической деятельностью и рост – с антициклонической, а в отдельные сезоны антициклональный режим преобладал на территории Пермского края, чего не отмечалось в предыдущие периоды.

С 2010 г. продолжительность залегания устойчивого снежного покрова увеличивается на фоне небольшого роста числа дней с циклонами и сниже-

ния – с антициклонами. Отмечается увеличение средней продолжительности залегания устойчивого снежного покрова до 167 дней.

Наконец, если рассматривать тридцатилетние периоды (табл. 1), для промежутка 1960–1989 гг. средняя дата образования УСП составляет 29 октября, а для периода 1990–2019 гг. – 4 ноября, т.е. смещение в сторону более позднего образования устойчивого снежного покрова составило 6 дней. Наибольший сдвиг отмечается на станциях Верещагино, Лысьва и Чернушка, в Губахе итоговых изменений не зафиксировано.

Таблица 1

Средние даты образования и разрушения, продолжительность залегания УСП в Пермском крае (1960–1990 и 1990–2020 гг.)

| Станция | Устойчивый снежный покров | | | | | |
|-----------------|---------------------------|-----------|------------------|-----------|----------------------------------|-----------|
| | Образование, дата | | Разрушение, дата | | Продолжительность залегания, дни | |
| | 1960–1990 | 1990–2020 | 1960–1990 | 1990–2020 | 1960–1990 | 1990–2020 |
| Ныроб | 23.10 | 27.10 | 27.4 | 27.4 | 186 | 181 |
| Вая | 20.10 | 25.10 | 4.5 | 1.5 | 196 | 188 |
| Усть-Черная | 27.10 | 4.11 | 23.4 | 24.4 | 177 | 170 |
| Чердынь | 24.10 | 27.10 | 26.4 | 26.4 | 184 | 181 |
| Гайны | 28.10 | 1.11 | 20.4 | 21.4 | 174 | 171 |
| Коса | 31.10 | 3.11 | 20.4 | 21.4 | 172 | 169 |
| Кочево | 29.10 | 1.11 | 19.4 | 20.4 | 172 | 170 |
| Березники | 28.10 | 2.11 | 18.4 | 23.4 | 171 | 172 |
| Кудымкар | 31.10 | 5.11 | 13.4 | 19.4 | 164 | 165 |
| Губаха | 29.10 | 29.10 | 19.4 | 25.4 | 172 | 178 |
| Чермоз | 31.10 | 7.11 | 16.4 | 18.4 | 167 | 162 |
| Добрянка | 1.11 | 7.11 | 17.4 | 18.4 | 166 | 161 |
| Бисер | 21.10 | 24.10 | 27.4 | 29.4 | 188 | 186 |
| Верещагино | 27.10 | 6.11 | 14.4 | 15.4 | 169 | 160 |
| Лысьва | 28.10 | 6.11 | 16.4 | 18.4 | 170 | 163 |
| Пермь | 29.10 | 7.11 | 14.4 | 16.4 | 167 | 160 |
| Кын | 28.10 | 2.11 | 17.4 | 19.4 | 171 | 168 |
| Б. Соснова | 2.11 | 9.11 | 18.4 | 16.4 | 167 | 158 |
| Оханск | 4.11 | 10.11 | 14.4 | 16.4 | 161 | 156 |
| Кунгур | 4.11 | 9.11 | 9.4 | 12.4 | 156 | 154 |
| Оса | 3.11 | 10.11 | 10.4 | 13.4 | 158 | 153 |
| Ножовка | 4.11 | 11.11 | 14.4 | 15.4 | 161 | 155 |
| Чайковский | 6.11 | 14.11 | 11.4 | 12.4 | 156 | 149 |
| Чернушка | 31.10 | 10.11 | 17.4 | 17.4 | 168 | 158 |
| Октябрьский | 29.10 | 2.11 | 19.4 | 21.4 | 172 | 170 |
| Средняя по краю | 29.10 | 4.11 | 18.4 | 20.4 | 172 | 167 |

Средняя по региону дата разрушения УСП сместилась на два дня в сторону более позднего наступления, причем в Губахе и Кудымкаре данный сдвиг составил 6 дней, а на станциях Вая и Б. Соснова, наоборот, устойчивый снежный покров стал разрушаться раньше на 3 и 2 дня соответственно.

За последние 30 лет количество дней с устойчивым снежным покровом в среднем сократилось со 172 до 167 дней по сравнению с периодом 1960–1990 гг., причем на 9 станциях уменьшение составило от 6 до 10 дней.

3. Тенденция роста средней высоты снежного покрова и запасов влаги в нем в Пермском крае, которая отмечалась в конце XX века, сменилась на обратную со смещением наступления максимумов указанных характеристик на более поздний период.

Средняя высота снежного покрова по Пермскому краю за период 1970–2020 гг. составляет 37 см, изменяясь от 24 см в Чермозе до 51 см в Губахе и 50 см в Вае. Максимальные значения за сезон превышают 90 см в пунктах Губаха, Бисер и Вая, т.е. станциях, относящихся к Уральским горам; не достигают 60 см в Осе, Верещагино и Чермозе, где на перераспределение СП оказывают влияние местные особенности окружающей территории.

В текущей работе при исследовании влагозапасов в снеге из-за особенностей организации маршрутных наблюдений учитываются только максимальные значения. В среднем по Пермскому краю за период 1970–2020 гг. максимальные влагозапасы достигали 192 мм, изменяясь на отдельных станциях от 128 в Осе до 320 мм в Бисере.

В первое десятилетие промежутка 1970–2020 гг. высота СП и запасы влаги в нем имеют относительно малые значения (рис. 7).

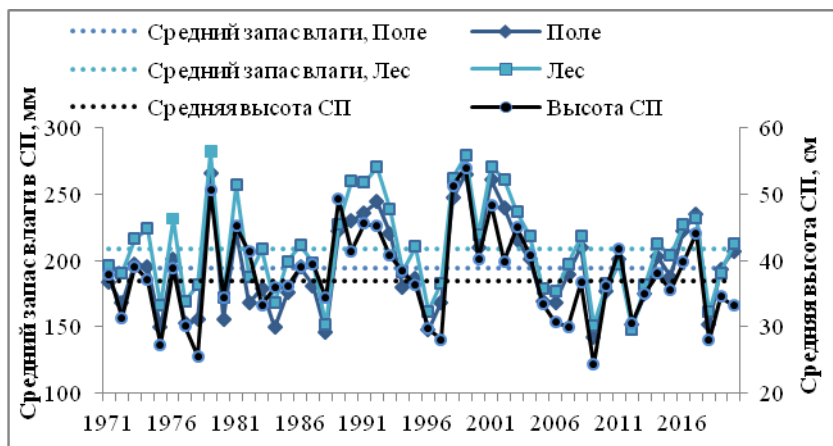


Рис. 7. Межгодовая изменчивость высоты снежного покрова (см) и запасов влаги в нем (мм) в Пермском крае (1970–2020 гг.).

Над территорией Урала и, в частности, Пермского края наблюдался рост числа форм восточной циркуляции по классификации Вангенгейма-

Гирса. Западная и меридиональная циркуляции отличались уменьшением повторяемости, что в совокупности привело к снижению общего количества осадков в течение холодного сезона.

Начиная с 80-х гг. до конца предыдущего столетия указанные характеристики снежного покрова росли на фоне увеличения повторяемости форм западной и меридиональной циркуляции и уменьшения восточной и, как следствие, роста количества осадков.

С началом XXI в. характер атмосферной циркуляции снова изменился: отмечается возврат к преобладанию форм восточной циркуляции. В промежуток с 2000 по 2010 гг. значения высоты снега и влагозапасов резко снижаются. Слабый рост, не позволяющий компенсировать предыдущее падение, отмечался во второе десятилетие XXI в.

Изменения влагозапасов в снеге в основном повторяют ход кривой высоты снежного покрова. В 7 из 50 лет проявляются отличия между линиями высоты СП и запасами влаги на полевом маршруте, гораздо чаще – на лесном.

Наиболее частое наступление сезонного максимума высоты СП в Пермском крае в 1970–2000 гг. наблюдалось в первой декаде марта – почти в 22% случаев (рис. 8). Вероятность формирования наибольшей высоты снежного покрова в диапазоне со второй декады февраля по вторую декаду марта в указанном периоде составляла более 75%.

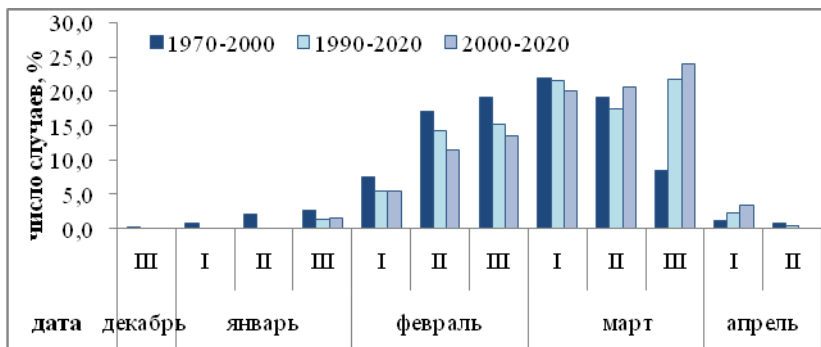


Рис. 8. Вероятность (%) наступления максимальной высоты снега в Пермском крае в зависимости от выбранного периода.

Если обратить внимание на промежуток 1990–2020 гг., то можно увидеть, что высота снега в этот период достигает своих максимальных значений как в первую (21,6%), так и в третью (21,7%) декаду марта. В XXI веке снова обнаруживается только один экстремум, но уже в конце марта (24%), а вероятность формирования наибольшей высоты снега в марте достигает 65%.

Таким образом, в последние годы в Пермском крае отмечается смещение наступления максимумов в сторону более позднего установления.

Запасы влаги в снежном покрове за период 1970–2000 гг. достигали максимальных значений в целом по Пермскому краю на полевом маршруте в

промежуток с 10 января по 25 апреля, на лесном – с 20 января по 5 мая, т.е. смещение составляет 10 дней. В то же время в последние годы наблюдается уменьшение указанного диапазона. Так, на полевом маршруте в период с 1990 по 2020 г. амплитуда колебаний сократилась на 25 дней (рис. 9а). Кроме того, пик вероятности возникновения наибольшего запаса влаги сместился с 20 на 31 марта и стал более выраженным.

На лесном маршруте разброс значений уменьшился на 35 дней (рис. 9б). В отличие от открытых участков, на залесенной территории максимальное значение не претерпело смещения по дате наступления, хотя и стало более акцентированным.

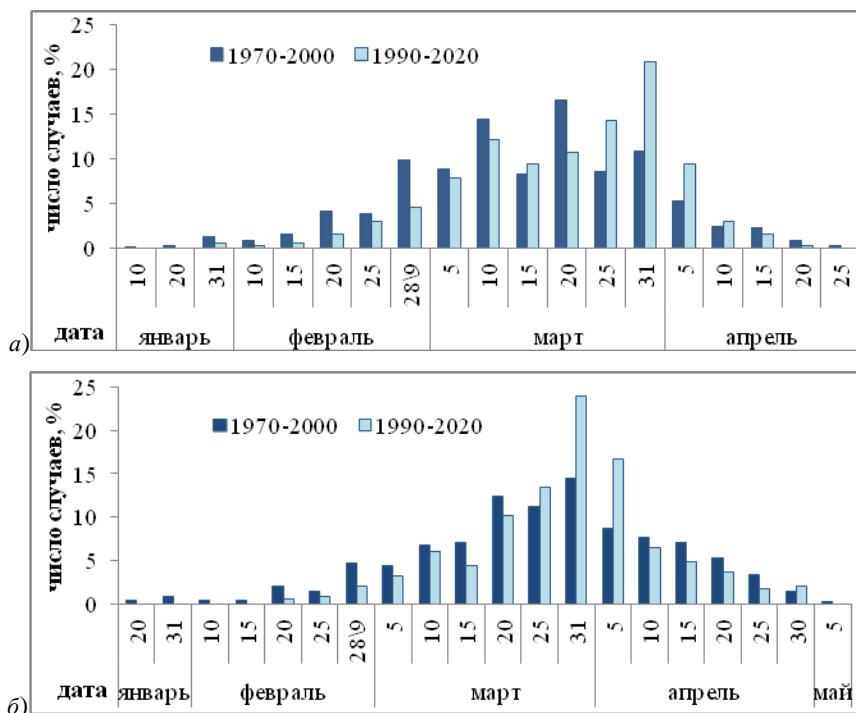


Рис. 9. Вероятность (%) наступления максимальной величины запасов влаги в снежном покрове на полевом (а) и лесном (б) маршруте в Пермском крае в зависимости от выбранного периода.

С другой стороны, изменилось положение второго по величине максимума: если в период 1970–2000 гг. для большинства станций наиболее частое повторение отмечается 20 марта, то в последние годы акцент сместился на 5 апреля. Таким образом, и на лесном маршруте можно констатировать некоторое смещение наступления максимумов на более поздние сроки.

4. Реанализ ERA5-Land на текущий момент является оптимальным по качеству источником данных при исследовании характеристик снежного покрова в Пермском крае.

Основным источником информации о характеристиках снежного покрова являются наблюдения на гидрометеорологических станциях и постах, однако они имеют ограничения в плане пространственного охвата территории, что не позволяет в полной мере оценить динамику процессов, связанных со снегом. В Пермском крае сеть метеорологических станций обеспечивает покрытие территории региона измерениями на расстоянии не более 50 км только на 44%. Привлечение данных гидрологических постов позволяет увеличить обеспеченность до 76%, однако этого все равно недостаточно. Оценка покрытия окружающей станцию местности снегом имеет субъективный характер. Существующая программа наблюдений за характеристиками снежного покрова в условиях пересеченного рельефа в каждом пункте позволяет получать информацию, характерную только для небольших по площади участков.

Одним из альтернативных источников данных о снежном покрове являются результаты дистанционного зондирования, полученные с помощью искусственных спутников Земли. Наблюдения производятся в оптическом, микроволновом и инфракрасном диапазонах, последовательно во времени и могут быть непрерывными в пространстве, однако из-за параметров орбиты и наличия облачности над территорией съемки часто имеют продолжительные перерывы, что является их недостатком. Кроме того, точность спутниковых измерений ниже, чем наземных.

Постоянного внимания требуют калибровка приборов и процедуры приведения данных, связанные с состоянием снежного покрова, влиянием на него растительности. Так, несмотря на то, что на безлесных участках наличие снега определяется с большой точностью, достоверность дешифрирования СП резко снижается при переходе его границы в залесенную зону.

Микроволновое дистанционное зондирование не подвержено влиянию облачного покрова и применяется для оценки запасов воды в снеге, однако во время оттепели или в период снеготаяния при наличии жидкой фазы в толще снега определение его параметров в микроволновом диапазоне невозможно по техническим причинам.

Потенциальным источником данных о снежном покрове являются реанализы – наборы гидрометеорологических данных в узлах регулярной сетки, позволяющие строить модельные глобальные поля метеорологических величин за истекшие годы. Преимущество реанализов заключается в полноте и однородности предоставляемой информации, а также охвате труднодоступных для наземных наблюдений территорий.

Наиболее известные реанализы производятся ведущими прогностическими центрами мира: Национальным центром прогнозирования окружающей среды (NCEP, США), Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) CFS, Японским метеорологическим агентством (JMA) и др. В данном исследовании используются данные массивов реанализов ECMWF. Выбор Евро-

пейского прогностического центра обусловлен анализом ряда публикаций, в которых проведены оценки качества различных реанализов. По результатам этих оценок можно сделать вывод об адекватном воспроизведении характеристик снежного покрова на глобальном уровне реанализом ERA Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды.

В процессе работы с данными реанализа ERA-Interim появилась информация о выходе новой версии продукта, ERA5, и прекращении обновления старых данных. Сведения о поверхности суши также представлены в детализированной версии реанализа ERA5-Land. Некоторые характеристики указанных реанализов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики различных версий реанализа ECMWF

| Версия реанализа | ERA-Interim | ERA 5 | ERA 5-Land |
|---|--|--|--|
| Доступный временной промежуток | с 1 января 1979 г. по 31 августа 2019 г. | с 1 января 1979 г. по настоящее время | Январь 1981 г. по настоящее время. Ведутся работы по увеличению периода до 1950 г. |
| Разрешение по горизонтали | 79 км | 31 км | 9 км |
| Разрешение по вертикали | 60 уровней от поверхности до 0,1 гПа | 137 уровней от поверхности до 0,01 гПа | поверхность |
| Разрешение по времени | 00, 06, 12 и 18 UTC | почасовое | почасовое |
| Единицы измерений высоты снежного покрова | Метры водного эквивалента | Метры водного эквивалента | Метры водного эквивалента; метры |
| Формат данных | GRIB1 | GRIB1 | GRIB1; GRIB2 |

Уменьшение шага сетки привело к увеличению детализации анализируемой информации, с каждой последующей версией реанализа ECMWF становится возможен учет локальных особенностей территории, которые могли быть пропущены при большом шаге пространственной сетки. Как видно, реанализы постоянно совершенствуются, исправляются ошибки более ранних версий, улучшается разрешение во времени и пространстве. Качество таких изменений требует специальной оценки.

Для верификации данных по высоте снежного покрова (в метрах) из реанализа ERA5-Land, осредненных за месяц, привлечены значения высоты снежного покрова по данным стационарных снегомерных реек 25 метеорологических станций Пермского края за период с октября 1990 по май 2020 г.

Сопоставление двух информационных массивов показывает, что среднемесячные значения высоты снежного покрова, которые содержатся в реанализе ERA5-Land, в целом превышают станционные данные. Это превышение, осредненное за октябрь–май, характерно для 88% станций, составив в среднем 6 см.

Значения средней ошибки реанализа 5 см и менее преимущественно соответствуют станциям, расположенным на западе Пермского края (рис. 10а), что можно считать хорошим результатом.

Наибольшие показатели (10 см и более) получены для Чайковского, Добрянки, Березников и станций, расположенных на востоке Пермского края вблизи Уральского хребта. Таким образом, наблюдается рост, за некоторым исключением, величины отклонений высоты снежного покрова по данным ERA5-Land от станционных наблюдений при перемещении с запада на восток. Эта закономерность прослеживается и при анализе абсолютных и относительных ошибок (рис. 10бв). На западе Пермского края величины отклонений в абсолютном выражении изменяются от 6 до 10 см, в относительном – от 12 до 29%, в то время как для восточных станций данные характеристики составляют 9–18 см (35–65%).

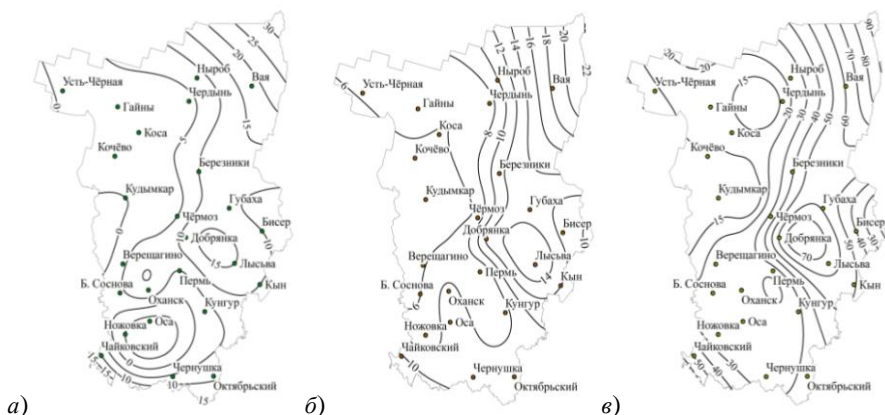


Рис. 10. Разница между наблюдениями за высотой снежного покрова на метеорологических станциях Пермского края и данными реанализа ERA5-Land (1990–2020 гг.):

- а, б – средняя и абсолютная ошибка, см;
- в – средняя относительная ошибка, %.

Исходя из приведенных выше расчетов можно сказать, что изменения величины ошибки носят в целом меридиональный характер, т.е. наблюдается прямая зависимость роста отклонений данных реанализа от фактических наблюдений при перемещении с западной части территории со средней высотой 170 м над уровнем моря на восток к Уральским горам, где высота пунктов наблюдений в среднем составляет 270 м над уровнем моря. Значения на отдельных станциях, не соответствующие данному положению, являются скорее исключениями и зависят от локальных условий местности.

Анализ среднего многолетнего сезонного хода высоты снежного покрова с 1990 по 2020 г. показывает, что максимальные значения по станционным данным приходятся на март, в то время как в ERA5-Land максимум на-

ступает в феврале, а в марте зафиксировано некоторое снижение средней высоты (рис. 11).

В результате в марте наблюдается относительно небольшое (13%) превышение данных ERA 5-Land над фактическими наблюдениями. В апреле, в период активного снеготаяния, разница становится более значительной. Наибольшие отличия в двух типах данных, несмотря на высокий уровень связи между стационарными данными и реанализом (коэффициент корреляции равен 0,78), наблюдаются в зимние месяцы, в частности в январе.

Превышение данных реанализа ERA5-Land над значениями инструментальных измерений, о котором упоминалось выше, отчетливо прослеживается при исследовании межгодовой изменчивости высоты снежного покрова по всей территории Пермского края (рис. 12).

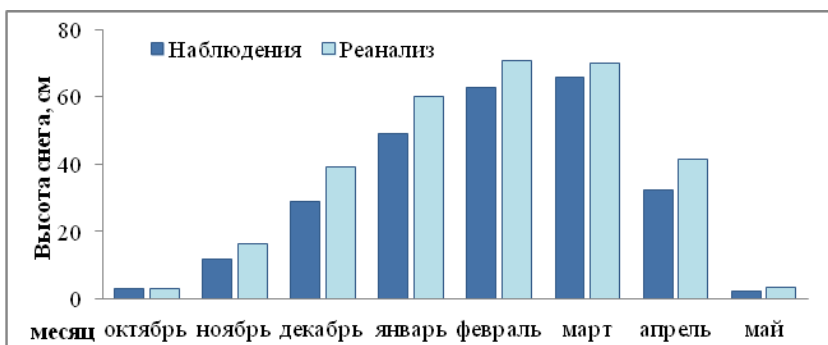


Рис. 11. Средние многолетние месячные значения высоты снежного покрова по данным стационарных наблюдений и реанализа ERA 5-Land (1990–2020 гг.).

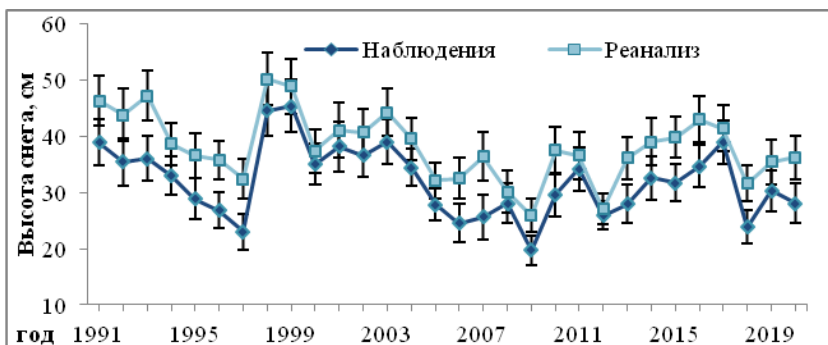


Рис. 12. Средняя высота снежного покрова на территории Пермского края по данным стационарных наблюдений и реанализа ERA5-Land (1990–2020 гг.).

Большая часть экстремумов, наблюдаемых на кривой стационарных наблюдений, отображается и на графике реанализа. В отдельные сезоны можно видеть некоторое расхождение тенденций.

В заключении представлены следующие выводы:

1. Влияние рельефа Пермского края на перераспределение зимних осадков является преобладающим обстоятельством при снегонакоплении по данным 56% станций. В остальных случаях на формирование снежного покрова влияет комплекс факторов, из которых можно дополнительно выделить растительность и метелевый перенос на открытых участках. Существенную роль в распределении снега играют микроформы рельефа из-за развитых речной и овражно-балочной сетей.

2. За последние 30 лет произошло смещение дат образования устойчивого снежного покрова на 6 дней, разрушения – на 2 дня в сторону более позднего наступления. Средняя продолжительность залегания УСП за последние 30 лет уменьшилась на 4–5 дней. После 2010 г. на фоне снижения интенсивности циркуляционных и температурных изменений наблюдалась тенденция к более раннему установлению и росту продолжительности залегания УСП.

3. Наиболее частое наступление сезонного максимума высоты СП в Пермском крае в 1970–2020 гг. наблюдалось в первой декаде марта, установление максимумов влагозапасов на открытой территории в период 1970–2020 гг. преимущественно наблюдалось 20 марта, на залесенной – 31 марта. В последние годы наблюдается смещение наступления максимумов на более поздний период, при этом на полевом маршруте указанная закономерность выражена сильнее, чем в лесу.

4. До конца XX в. наблюдался рост средней высоты снежного покрова, после чего отмечалось уменьшение данной характеристики. В период 2010–2020 гг. зафиксировано уменьшение интенсивности снижения высоты СП по сравнению с предыдущим десятилетием. На протяжении 1970–2020 гг. ни в одном из 25 пунктов наблюдений не зафиксировано ни постоянного роста, ни падения высоты СП.

5. Значения максимальных запасов влаги показывали рост в первую половину исследуемого периода и снижение во вторую, при этом итоговое увеличение максимальных влагозапасов зафиксировано в 61% случаев.

6. В связи с отсутствием достаточного количества данных фактических наблюдений за снежным покровом реанализ ERA5-Land является оптимальной альтернативой, однако при этом необходимо учитывать ряд особенностей. Межгодовая изменчивость снежного покрова в среднем по Пермскому краю адекватно воспроизводится реанализом. С другой стороны, данный реанализ завышает значения высоты снежного покрова по отношению к наблюдениям для большей части метеорологических станций Пермского края, а на станциях Оса и Ножовка обнаружено систематическое занижение реанализом показаний инструментальных измерений. Исследование сезонной изменчивости показывает смещение в сторону более раннего наступления максимумов высоты снежного покрова в реанализе ERA5-Land по отношению к фактическим значениям. Изменения величины ошибки по территории Пермского края носят в целом меридиональный характер, наблюдается прямая

зависимость роста отклонений данных реанализа от фактических наблюдений при перемещении с западной равнинной территории на восток к Уральским горам, за исключением отдельных станций.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из списка ВАК:

1. **Крючков А.Д.**, Истомина О.В. Динамика снежного покрова на территории Пермского края за период 1988–2018 гг. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле, 2019. Т. 29. Вып. 2. С. 243–251.

2. **Крючков А.Д.**, Калинин Н.А. Сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 95–110. DOI 10.37162/2618-9631-2021-2-95-110.

Статьи в других изданиях:

1. **Крючков А.Д.** Верификация характеристик снежного покрова по данным реанализа ERA-INTERIM и метеорологических станций Пермского края за 1978–2018 гг. / Цифровая география. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. Пермь, 2020. Т. 1. С. 390–393.

2. **Крючков А.Д.** Влияние микроформ рельефа на распределение характеристик снежного покрова // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–24 апреля 2021 года. Екатеринбург, 2021. С. 58–67. DOI 10.26170/KFG-2021-08.

3. **Крючков А.Д.** Динамика основных характеристик снежного покрова на территории Пермского края за период 1950-2017 гг. // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России [Электронный ресурс]: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. г. Иркутск, 2018. С. 157–162.

4. **Крючков А.Д.** Сравнительный анализ высоты снежного покрова по данным стационарных и ландшафтно-маршрутных наблюдений в Пермском крае // Климатические риски и космическая погода: материалы Международной конференции и Школы молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой, Иркутск, 14–17 июня 2021 года. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2021. С. 352–359.

5. Пищальникова Е.В., **Крючков А.Д.** Метеорологические условия формирования временного снежного покрова на территории Пермского края в теплый период года. / Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. Материалы международной научно-практической конференции. Посвящается 85-летию факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ, Воронеж, 3–5 октября 2019 года / Под общей редакцией С.А. Куролапа, Л.М. Акимова, В.А. Дмитриевой. Воронеж: «Цифровая полиграфия». С. 255–258.

Подписано в печать _____._____.2021 г. Формат 60x84/16
Усл. печ. л. ____ Тираж 100 экз. Заказ _____
614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, д. 15, корп. В, кв. 143
ИП Пирожков Николай Владимирович