

На правах рукописи



ШАЙДУЛИНА
Аделия Александровна

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
СНЕГОТАЯНИЯ НА ВОДОСБОРЕ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Специальность 1.6.16 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2023

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

**Научный
руководитель:**

Калинин Виталий Германович
доктор географических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:**

Болгов Михаил Васильевич
доктор технических наук, главный научный
сотрудник, зав. лабораторией моделирования
поверхностных вод ИВП РАН

Банщикова Любовь Святославовна
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник,
руководитель отдела научно-технической
информации ФГБУ «ГГИ»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный университет» (СПбГУ),
Институт наук о Земле

Защита состоится « » 2023 г. в часов на заседании
диссертационного совета 24.1.049.03 на базе ФГБУН «Институт
географии Российской академии наук» по адресу: 119017, г. Москва,
Старомонетный пер., 29. С диссертацией можно ознакомиться в
библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, г. Москва,
Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>.

Автореферат разослан « » 2023 г.

Отзывы на автореферат (в электронном виде в формате pdf и на
бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные подписью и
печатью) просим направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный
пер, д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета 24.1.049.03,
Титковой Т.Б. Факс 8 (495) 959-00-33, e-mail: d00204604@igras.ru

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат географических наук



Титкова Т.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Расчеты снеготаяния на речных водосборах лежат в основе практически всех моделей формирования стока весеннего половодья. Методы расчета интенсивности снеготаяния для прогноза талого стока рек разрабатываются с середины XX века (Комаров, 1947, 1959; Кузьмин, 1947, 1961; Лебедева, 1959; Делеур, 1974; Шутов, 1993, Галахов, 2003; Коронкевич, Ясинский, Кашутина, 2007, 2020, 2022). Основными методами расчета снеготаяния являются метод водного баланса, заключающийся в расчете слоя воды, образовавшейся за период между снегосъемками и метод теплового баланса, в основе которого лежит расчет общего притока тепла на водосбор в период снеготаяния от солнечной радиации, теплообмена с атмосферой и подстилающей поверхностью и др. Поскольку расчет теплового баланса снежного покрова весьма требователен к исходным метеорологическим данным, в практике гидрологических расчетов и прогнозов широко применяются его модификации. К их числу относится метод температурных коэффициентов, основанный на предположении о линейной связи между количеством стаявшего снега и приземной температурой воздуха. Достоинством последнего является минимальная требовательность к исходным данным и возможность применения на разных водосборах независимо от их размера и положения.

Расчеты снеготаяния являются частью физически обоснованных моделей формирования речного стока: Е.А. Anderson (1976), Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан (2000, 2004, 2010). Применение в таких расчетах ГИС-технологий отражено в работах С.Г. Яковченко (2006), Д.А. Буракова и О.И. Ивановой (2010), С.В. Пьянкова и А.Н. Шихова (2014, 2018, 2019, 2021). Современные методы реализованы в виде технологий и программных комплексов: *ECOMAG* (Motovilov et al., 1999; Мотовилов, Гельфан, 2018); «Гидрограф» (Виноградов, 1988; Виноградов, Виноградова, 2010), *HBV* (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model*); *SRM* (*Snowmelt Runoff Model*), *JULES* и рассмотрены в работах Bergström et al. (1992), Yang J et al. (2006), J. Parajka (2010), Abudu S et al. (2012).

Однако перечисленные модели и методы редко находят применение в работе региональных подразделений Росгидромета (в том числе в Пермском ЦГМС). В настоящее время существует **проблема** – расчеты снеготаяния и притока воды в водохранилища выполняются с использованием методов, разработанных еще в середине XX в., которые с тех пор не совершенствовались. Поэтому достаточно **актуальным** является поиск новых методов и технологий, позволяющих повысить качество расчетов. Это особенно важно для территории Пермского края, где насчитывается более 29000 рек, имеющих преимущественно снеговое питание (доля талого стока составляет 55-70% от годового). На их берегах расположено множество населенных пунктов, десятки из которых

регулярно подвергаются затоплению в период весеннего половодья. Кроме того, расчет интенсивности снеготаяния и притока талых вод имеет большое значение для специалистов ПАО «РусГидро» – «Камская ГЭС» при определении режима использования водных ресурсов в периоды предполоводной сработки и наполнения водохранилища.

Важнейшее направление совершенствования методов расчета снеготаяния основано на применении ГИС-технологий. В частности, ГИС-технологии дают возможность более детально учитывать свойства подстилающей поверхности на водосборах, а также рассчитывать пространственно-временную динамику снежного покрова и запаса воды в нем с различным пространственным разрешением и шагом по времени.

Цель работы состоит в выявлении пространственно-временных закономерностей процесса снеготаяния на водосборе Камского водохранилища с использованием геоинформационного моделирования.

Объект исследования – процесс снеготаяния на речных водосборах.

Предмет исследования – пространственно-временные закономерности снеготаяния на водосборе Камского водохранилища.

Для реализации поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. На основе метода температурных коэффициентов разработать геоинформационную модель снеготаяния, учитывающую пространственно распределенную метеорологическую информацию и особенности подстилающей поверхности водосбора.

2. Выполнить посуточный расчет значений слоя стаявшего снега и снегозапаса за период снеготаяния с оценкой погрешностей моделирования.

3. Разработать метод верификации результатов моделирования процесса снеготаяния по космическим снимкам.

4. Провести валидацию разработанной модели снеготаяния за разные годы и на разных по размеру водосборах рек.

5. Выявить пространственно-временные закономерности снеготаяния на исследуемых водосборах.

Информационная база исследования.

1. Картографические данные – электронные топографические карты Роскартографии масштабов 1:100000 и 1:200000, представленные в виде отдельных слоев точечных, линейных и полигональных объектов (водные объекты, леса, отметки характерных точек рельефа и урезов воды, горизонтали), а также тематические карты (метеостанции (МС) и гидрологические посты (г/п) с точной географической привязкой, границы водосборов, карты почвенно-растительного покрова). Для расчетов снеготаяния на весь водосбор Камского водохранилища использована информация о рельефе по глобальной модели *GEBCO_2022 Grid*.

2. Метеорологические данные – информация о максимальных снегозапасах (мм слоя воды) и датах их наступления на полевых и лесных

снегомерных маршрутах, данные снегосъемок в период таяния, ежедневные значения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) и осадков (мм) в период таяния снежного покрова. Для выполнения расчетов и верификации модели собраны материалы ежедневных наблюдений по 46 метеостанциям, метео- и гидрологическим постам за период весеннего снеготаяния 2002–2020 гг.

3. Космические снимки исследуемой территории со спутника Terra полученные спектрорадиометром среднего разрешения *MODIS*, дешифрованные в программном пакете *ScanEx Image Processor* для периода весеннего снеготаяния 2002–2020 гг.

В ходе разработки модели проведено ее тестирование на примере речных водосборов, отличающихся по размерам, особенностям рельефа и относящихся к равнинной – г/п Коса-Коса ($A=6221 \text{ км}^2$, разрешение ЦМР 0,1 км), г/п Кама-Гайны ($A=27822 \text{ км}^2$, разрешение ЦМР 0,3 км), г/п Сытва-Подкаменное ($A=19543 \text{ км}^2$, разрешение ЦМР 0,25 км) и горной – г/п Вишера-Рябинино ($A=31083 \text{ км}^2$, разрешение ЦМР 0,3 км) частям водосбора Камского водохранилища. Валидация геоинформационной модели для всего водосбора Камского водохранилища ($A=168000 \text{ км}^2$, разрешение ЦМР 0,25 км) выполнена за период 2010–2020 гг. Сложный, сильно расчлененный рельеф с перепадами высот от 80 до 1469 м над уровнем моря, значительная залесенность и развитая речная сеть создают условия для неоднородности пространственного распределения и накопления снежного покрова на исследуемой территории.

Применяемые программные средства ГИС: *MapInfo 10.5*; *ArcGIS 10.4*.

Для решения поставленных задач в работе применялся ряд **методов**. Основой разработанной модели снеготаяния является метод температурных коэффициентов, разработанный В.Д. Комаровым (1947) и адаптированный Н.Д. Лебедевой (1959) для условий Камского бассейна. Данный метод был усовершенствован с применением ГИС-технологий. Также в работе использованы географо-гидрологический и аналитический методы, метод аналогий, статистические методы (при верификации и валидации результатов), геоинформационное моделирование и картографирование, дешифрирование спутниковых снимков.

Научная новизна проведенного исследования заключается в следующем:

1. Разработана и реализована средствами ГИС модель для посуточного расчета снеготаяния на основе метода температурных коэффициентов, учитывающая неравномерность пространственного распределения метеорологической информации и особенности подстилающей поверхности. В частности для учета влияния рельефа выявлены и введены в качестве параметров модели зависимости максимального снегозапаса от высоты и экспозиции склонов.

2. Предложен новый подход к использованию данных метеорологических наблюдений и снегомерных съемок в модели снеготаяния, и выполнена его программная реализация.

3. На основе спектральных индексов, рассчитанных по снимкам со спутника Тетта (сенсор *MODIS*), выполнена верификация результатов расчетов пространственного распределения снежного покрова, и показано существенное преимущество индекса *NDFSИ* в сравнении с традиционно используемым *NDSИ* при проведении расчетов для залесенных водосборов.

4. Выявлены пространственно-временные закономерности снеготаяния на склонах разной экспозиции с учетом влияния широтной и высотной зональности для разных по размеру речных водосборов.

5. Выполнена оценка эффективности разработанной геоинформационной модели и проведена ее валидация на водосборе Камского водохранилища для выявления пространственно-временной динамики снеготаяния за годы с разными метеорологическими условиями, которая показала отсутствие систематического завышения или занижения расчетного снегозапаса.

Теоретическая и практическая значимость работы. Методические разработки диссертации могут найти применение в работе научных и проектных организаций. Получен акт о внедрении результатов диссертационного исследования в работу отдела гидрологии Пермского ЦГМС. Результаты исследований будут востребованы: специалистами ПАО «РусГидро» – «Камская ГЭС» при прогнозах весеннего половодья и расчетах притока к створу Камской ГЭС; органами МЧС для оценки затопления и подтопления территорий.

Результаты диссертационного исследования используются при проведении занятий по курсам: «Гидрологические прогнозы», «Гидрофизика» в Пермском государственном национальном исследовательском университете.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, сборе и обработке исходных материалов, выполнении расчетов и анализе их результатов.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается верификацией по спутниковым данным и данным снегомерных съемок, которая выполнена для бассейнов с разными физико-географическими условиями и использованием надежной исходной информации, полученной по методикам, принятым на сети наблюдений.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на кафедре гидрологии и охраны водных ресурсов, расширенном заседании кафедр гидрологии и охраны водных ресурсов, картографии и геоинформатики, метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета, а также совместном заседании лабораторий гидрологии, климатологии и отдела

гляциологии ИГ РАН. Результаты исследований докладывались и обсуждались на региональных, всероссийских и международных научных конференциях, съездах и семинарах, в том числе: **2019, 2021, 2023 г. Пермь:** Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов»; **2020 г. Санкт-Петербург:** Международная научно-практическая конференция «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению»; **2021 г. Республика Беларусь, Минск:** Международная научно-практическая очно-заочная конференция «Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках»; **2021 г. Пермь:** XV Всероссийская научно-исследовательская конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Географическое изучение территориальных систем»; **2021 г. Уфа:** XIV Фестиваль наук о Земле и туризма. Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы естественных наук» с международным участием. **2022 г. Пермь:** Международный научный форум «Наука и глобальные вызовы XXI века»; **2022 г. Нижний Новгород:** Всероссийская научная конференция «Проблемы экологии волжского бассейна (ВОЛГА-2022)».

Публикации. По теме диссертации имеется 13 публикаций, из них: в журналах из списка ВАК – 3 работы, в изданиях, индексируемых в *Scopus* – 4 статьи. Подготовлено к регистрации 2 РИД (база данных и геоинформационная модель снеготаяния).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. В работе 178 страниц, 47 рисунков и 17 таблиц. Библиографический список насчитывает 228 источников, из них 46 на иностранном языке.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, д.г.н. В.Г. Калинину, сотрудникам кафедр гидрологии и охраны водных ресурсов, картографии и геоинформатики, метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета, а также д.г.н. Н.А. Калинину, д.г.н. А.Н. Шихову, к.г.н. Е.В. Пищальниковой за помощь, поддержку и ценные советы.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Использование метода температурных коэффициентов, реализованного в ГИС, совместно с цифровыми моделями рельефа и тематическими картами, содержащими большой объем качественной и количественной информации о подстилающей поверхности, дает возможность предложить геоинформационную модель для посуточного расчета пространственно-временных изменений залегания снега на водосборе и запаса воды в нем.

В работе используется модель снеготаяния, основанная на методе

температурных коэффициентов, который включает в себя определение суточного объема талой воды по выражению (1)

$$A_0 h = 5tA_n P_n + 2tA_l P_l, \quad (1)$$

где h – количество стаявшего снега в пересчете на воду, мм слоя; A_0 – общая площадь бассейна, км²; A_n, A_l – площади поля и леса, км²; P_n, P_l – покрытость поля и леса снегом (в долях единицы площади); t – среднесуточная положительная температура воздуха, °С.

Покрытость снегом отдельно для поля и леса определяется при помощи графиков обеспеченности снегозапасов, полученных В.Д. Комаровым, и зависит от начальных снегозапасов S (мм) и суммы положительных температур воздуха $\Sigma t+$ (°С), накопившихся от начала снеготаяния. Принимая, что при увеличении положительной температуры воздуха на 1°С в поле стаивает 5 мм снежного покрова (в пересчете на воду), а в лесу – 2 мм, рассчитывается слой стаявшего снега на каждый день от начала таяния. Далее ведется расчет модульного коэффициента стаявшего снега, представляющего отношение количества талой воды к величине снегозапаса на начало таяния отдельно для леса и поля. Учет возврата воды, ушедшей на водозадержание снегом, с момента начала водоотдачи из снега до конца снеготаяния возможен с помощью коэффициентов для леса (1,25) и поля (1,43). Подача воды от снеготаяния h определяется по формуле (2):

$$h = (1,25\alpha_n + 1,43\alpha_l)t, \quad (2)$$

где α_n – водоотдача со всей площади, занятой полем, мм/°С; α_l – водоотдача со всей площади, занятой лесом, мм/°С; t – среднесуточная положительная температура воздуха, °С.

Для учета осадков, выпадающих в период снеготаяния в виде снега или дождя, используется уравнение (3):

$$x_{ж} = 4,92t + 36,60, \quad (3)$$

где $x_{ж}$ – доля жидких осадков, %; t – среднесуточная температура воздуха, °С. При отрицательной среднесуточной температуре воздуха осадки, выпавшие за сутки, полностью относятся к твердым и добавляются к снегозапасам. При положительной температуре воздуха выполняется разделение жидкой и твердой составляющих осадков. Доля жидких осадков определяется за каждые сутки по уравнению (3) и их величина (мм) добавляется к слою стаявшего снега.

Применение методов геоинформационного моделирования и картографирования позволяет учитывать пространственное распределение снежного покрова и последовательность его таяния при прогнозировании объема воды, поступающего на водосбор в весенний период. Их основными преимуществами являются автоматизация расчетов и возможность визуального представления полученных результатов и выполнение пространственного анализа. Для расчета весеннего снеготаяния разработаны картографическая и атрибутивная базы данных ГИС, а также программный модуль «Расчет снеготаяния» (рис. 1).

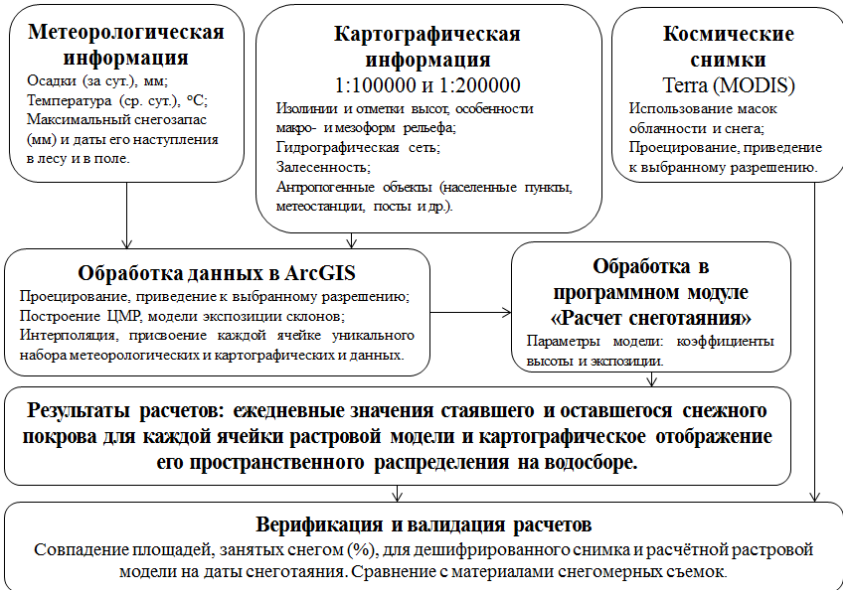


Рис. 1. Общая схема расчетов процесса снеготаяния и их верификации

Важной задачей является пространственное распределение метеорологической информации, определенной в точках метеостанций, по всем растровым ячейкам водосбора. Для этого используется инструмент интерполяции «полигоны Вороного, который относит растровые ячейки к пункту наблюдений на основе максимальной близости, т.е. представляет из себя участок территории, «контролируемый» метеостанцией. При этом учитывается, что рассматриваемые метеорологические характеристики могут измеряться не на всех пунктах наблюдений. Поэтому полигоны влияния строятся для каждой характеристики отдельно.

Таким образом, создана уникальная база пространственных данных о особенностях подстилающей поверхности (залесенности, высоте, сторонах света) и метеорологической информации, которая используется при автоматизированном расчете подачи воды на водосбор в процессе снеготаяния по методу температурных коэффициентов. Результатом расчетов являются посуточные значения слоя стаявшего снега (мм), снеговосапа (мм) и доли оставшегося снежного покрова (%) в точках, соответствующих ячейкам растровой модели водосбора.

2. При расчетах снеготаяния в речном бассейне необходим учет свойств подстилающей поверхности: высоты, уклона и экспозиции склонов, а также наличия древесной растительности в виде коэффициентов, критерием оценки которых является минимальная относительная погрешность моделирования снеговосапа и слоя

стаявшего снега, полученная в результате сравнения расчетных и фактических данных.

В методике расчета снеготаяния Н.Д. Лебедевой (1959), адаптированной для Камского бассейна, принимается средняя лесистость водосбора по данным на 1959 г., без учета ее пространственного распределения по территории. Также не учитываются особенности рельефа, оказывающие значительное влияние на неравномерность формирования и таяния снежного покрова.

Учет высоты места в расчетах снеготаяния возможен путем введения поправочных коэффициентов. Для определения значений коэффициентов высотного положения использованы результаты исследований К.Д. Миковой и Е.В. Трифионовой (2008), которые на основе материалов многолетних наблюдений получили линейные эмпирические зависимости максимального снегозапаса от высоты места (с коэффициентами корреляции $0,72 \div 0,99$) отдельно для полевой и лесной территорий северных и южных районов водосбора Камского водохранилища. Оценка этих зависимостей показала, что средняя ошибка расчетов не превышала 7,4% от фактической величины, а обеспеченность допустимой погрешности прогностических зависимостей составила от 67 до 100%.

Учет влияния экспозиции склонов также возможен путем введения различных коэффициентов. При этом возникает вопрос об их величинах для склонов разной экспозиции и постоянстве во времени. Геоинформационное моделирование величины плотности теплового потока (Вт/м^2), поступающего в апреле на склоны разной экспозиции и крутизны рассматриваемых водосборов, позволило создать модельные карты пространственного распределения солнечной радиации со значениями за каждый день. Расчеты показали, что плоско-равнинные поверхности, западные и восточные склоны водосборов получают примерно равное количество солнечной радиации, которое незначительно возрастает с увеличением крутизны склонов. Поэтому для них коэффициенты экспозиции могут быть приняты равными 1,0.

Для определения оптимальных коэффициентов экспозиции северных и южных склонов предложен метод выбора их значений, заключающийся в вычислении суточных величин оставшегося снегозапаса и слоя стаявшего снега (мм) при пошаговом изменении коэффициентов экспозиции для северных и южных склонов. Исследование проведено для 56 комбинаций значений этих коэффициентов с постоянным шагом. Т.к. максимальное поступление тепла от прихода солнечной радиации характерно для южных склонов, шаг их изменения принят 0,5, а диапазон значений коэффициентов составил $1,0 \div 5,0$. На северные склоны поступает меньше всего солнечной радиации, поэтому значение коэффициента для северных склонов не может быть больше 1,0. Шаг изменения коэффициентов севера составил 0,1, а диапазон выбора значений – $0,0 \div 1,0$.

Критерием правильности подбора коэффициентов экспозиции принята величина относительной погрешности моделирования снеготаяния и слоя стаявшего снега (%), рассчитанная как разность модельного и фактического значений, отнесенная к фактическому значению, δ (4):

$$\delta = \frac{|\overline{S_m} - \overline{S_f}|}{\overline{S_f}} 100\% \quad (4)$$

где $\overline{S_m}$ – среднее модельное значение, $\overline{S_f}$ – среднее фактическое значение.

Для величины снеготаяния в качестве фактических данных использована информация с метеорологических станций, расположенных в пределах водосбора. Для слоя стаявшего снега результаты модельных расчетов сравнивались с аналогичными слоями, вычисленными по методике Пермского ЦГМС.

Расчеты выполнены для 2002, 2004, 2010 и 2015 гг. с разными метеорологическими условиями и протяженностью снеготаяния. Так, 2002 и 2015 гг. характеризуются средними сроками начала (середина первой декады апреля) снеготаяния, но различной протяженностью (последнее более растянуто во времени). Поздние сроки начала снеготаяния (последняя декада апреля) отмечались в 2004 году, а раннее начало снеготаяния (конец марта) пришлось на 2010 год, весной которого наблюдалось преобладание антициклонального типа погоды. Модельным водосбором для установления значений коэффициентов экспозиции по предложенной методике был принят средний по размеру водосбор г/п Коса-Коса (табл. 1).

Таблица 1

Оценка погрешности расчетов снеготаяния в весенние периоды 2002, 2004, 2010 и 2015 гг. на примере водосбора г/п Коса-Коса

Дата	Относительная средняя погрешность моделирования (%) при разных значениях коэффициентов экспозиции северных и южных склонов				
	0,3/ 5,0	0,6/ 3,0	0,9/ 1,5	0,5/ 1,5	при переменных коэффициентах: 0,3/5,0 0,6/3,0 и 0,9/1,5
05.04	4,9	5,2	5,5	5,8	4,9
10.04	12,6	13,3	13,1	11,2	12,6
15.04	6,0	8,8	10,2	7,0	6,0
20.04	7,9	14,0	17,6	7,6	14,0
25.04	23,3	21,7	20,1	15,1	20,1
30.04	33,4	29,2	38,6	24,0	38,6
Среднее значение	14,7	15,4	17,5	11,8	16,0

Примечание: полужирным шрифтом выделены значения минимальной относительной погрешности на каждую дату.

Анализ результатов расчета относительной погрешности моделирования как снеготаяния, так и слоя стаявшего за день снега показал, что их минимальные значения наблюдаются в двух случаях:

- при плавном изменении коэффициентов в течение периода снеготаяния: увеличение для северных (числитель) и уменьшение для южных (знаменатель) склонов (0,3/5,0 до 15.04; 0,6/3,0 до 20.04; 0,9/1,5 до конца снеготаяния);

- при использовании постоянных коэффициентов для всего периода снеготаяния (0,5/1,5 для северных/южных склонов).

В целом для весеннего периода наилучшее совпадение расчетного снеговзапаса с фактическими данными (табл. 1) наблюдается при постоянных коэффициентах (0,5/1,5). Им соответствует минимальная погрешность моделирования, которая в среднем составляет 11,8%. Использование больших коэффициентов (5,0) для южных склонов дает наилучшие результаты только в начале периода снеготаяния. При переменных коэффициентах погрешность моделирования снеговзапасов минимальна только в начале периода, а к концу снеготаяния увеличивается до 38,6%.

Наименьшее совпадение рассчитанного снеговзапаса с фактическими данными возникает в самом конце периода снеготаяния, что может быть связано как с ошибками моделирования, так и с ошибками получения самих фактических наблюдаемых величин из-за сложности выполнения измерений.

Величина оставшегося снежного покрова на каждый день при разных парах коэффициентов различна, поэтому выполнен сравнительный анализ рассчитанных сумм слоев стаявшего снега (мм) за отдельные временные периоды для условий постоянных и переменных коэффициентов с данными, полученными по методике ЦГМС (рис. 2).

В первом и втором временном промежутках (от начала снеготаяния до 15.04 и от 16.04 до 20.04) средние погрешности моделирования значений сумм слоев стаявшего снега с использованием постоянных и переменных коэффициентов составляют 12,6 и 23,1% соответственно. В последнем временном отрезке (с 21.04 и до конца снеготаяния) наилучшее совпадение расчетных и фактических данных также соответствует применению постоянных коэффициентов экспозиции северных и южных



Рис. 2. Относительная погрешность моделирования (%) слоя стаявшего снега при использовании постоянных и переменных коэффициентов экспозиции склонов для водосбора г/п Коса-Коса

склонов (0,5 и 1,5), а относительная погрешность моделирования колеблется в пределах 0,4-7,2%. Использование переменных коэффициентов приводит к завышению слоя стаявшего снега от 3,8 до 58,0%. При постоянных коэффициентах в течение всего периода снеготаяния погрешность моделирования не превышает 13,4%.

Выполнена верификация значений расчетного снеговозраста в точках снегомерных маршрутов с данными метеорологических станций. Расчеты показали, что погрешность моделирования составляет в среднем 8,7%. Коэффициенты корреляции, отражающие тесноту связи расчетного и фактического снеговозраста, по разным метеостанциям изменяются в пределах $0,81 \div 0,97$.

Таким образом, критерием правильности выбора значений коэффициентов экспозиции северных и южных склонов выступают минимальные величины относительной погрешности моделирования снеговозраста и слоя стаявшего снега. Их расчет для лет с разными метеорологическими условиями периода снеготаяния позволил принять величину поправочных коэффициентов экспозиции для северных склонов – 0,5; для южных – 1,5.

3. Предложенный метод верификации результатов расчетов снеготаяния дает возможность выполнять качественную и количественную оценку результатов моделирования для разных по размеру водосборов на любую дату весеннего периода, на основе их сравнения со спутниковыми данными о площади снегового покрытия.

Одним из главных достоинств применения ГИС-технологий является получение модельной карты пространственного распределения снежного покрова в пределах водосбора на любую дату снеготаяния. Проверка правильности результатов моделирования возможна путём их верификации с фактическим оставшимся снежным покровом по космическим снимкам исследуемой территории. При этом крайне важным является способ дешифрирования снежного покрова.

Обычно для дешифрирования снежного покрова используется нормализованный относительный индекс снега *NDSI* (*normalized difference snow index*). Он является эффективным показателем для картографирования снежного покрова в больших масштабах. Однако, как показали исследования (Wang X, Wang J et al., 2015; Wang X, Chen S, Wang J, 2020) в пределах залесенных речных бассейнов точность идентификации снега с использованием этого индекса снижена, поэтому в настоящей работе использован другой индекс, получивший название *NDFSИ* (*normalized difference forest snow index*), преимущество применения которого доказано в работах китайских исследователей.

Расчет индексов производится по следующим формулам (5, 6):

$$NDSI = \frac{(P_{\lambda green} - P_{\lambda swir})}{(P_{\lambda green} + P_{\lambda swir})}, \quad (5)$$

$$NDFSИ = \frac{(P_{\lambda nir} - P_{\lambda swir})}{(P_{\lambda nir} + P_{\lambda swir})}, \quad (6)$$

где P коэффициент отражения излучения с длиной волны λ , нм (*green* – яркость в зеленом канале; *swir* – яркость в среднем инфракрасном канале; *nir* – яркость в ближнем инфракрасном канале).

В настоящей работе проведен сравнительный анализ результатов дешифрирования космических снимков исследуемых водосборов индексами *NDSI* и *NDFSИ* для весеннего периода 2004, 2010 и 2015 гг. Результаты исследования подтвердили преимущество индекса *NDFSИ*. Его использование существенно (до 30%) повышает качество дешифрирования снежного покрова, что особенно важно для второй половины периода снеготаяния.

Верификацию результатов моделирования можно выполнить как путем визуального сравнения модельных карт и дешифрированных космических снимков (что является крайне субъективным), так и с использованием количественных методов оценки.

Для количественной оценки результатов моделирования пространственного распределения снежного покрова предложен следующий методологический подход:

- автоматическое дешифрирование космического снимка для определения фактической площади, занятой снегом, с последующей его трансформацией в растровую карту;

- построение растровой модельной карты пространственного распределения снежного покрова на дату космического снимка с учётом коэффициентов экспозиции склонов и высоты местности;

- количественное сравнение модельной карты и дешифрированного снимка с использованием оверлейных операций для каждой растровой ячейки (где снег есть и где снега нет).

В результате расчетов получаем два значения:

- долю совпадающих по значению ячеек расчётной растровой карты с дешифрированным снимком;

- долю совпадающих по значению ячеек дешифрированного снимка с расчётной растровой картой.

Обязательные условия сравнения растровых карт – их одинаковая проекция, пространственное разрешение и расположение ячеек строго друг под другом. При трансформации дешифрированного космического снимка в растр в каждую его ячейку записывается информация о наличии (1), либо отсутствии (0) снежного покрова. Результатами модельных расчётов являются величина оставшегося снежного покрова в абсолютных (мм слоя), и в относительных значениях (долях от единицы, $0 \div 1$). Для выполнения попиксельного сравнения необходимо, чтобы в каждой ячейке растровой модели также была информация о наличии (1), либо отсутствии (0) снежного покрова. Т.е. вычисленное значение доли оставшегося снега следует округлить либо до 1, либо до 0.

Расчеты площади совпадения (%) растровой карты и дешифрированного снимка при разных значениях доли оставшегося в ячейке снега ($0,1 \div 0,9$) с шагом 0,2 позволили принять в качестве «критерия округления» значение 0,5 (если значение доли $\geq 0,5$, то

присваиваем 1 – снег есть, если $< 0,5$, то присваиваем 0 – снега нет).

Выполнена количественная оценка результатов моделирования пространственного распределения снежного покрова за годы с разными метеорологическими условиями и для разных по размеру водосборов бассейна Камского водохранилища. Верификация показала что величина совпадения площадей для равнинных водосборов (г/п Коса-Коса и Кама-Гайны) не зависит от площади водосбора и составляет в среднем 64,9% и 57,4% соответственно. Для южного водосбора г/п Сылва-Подкаменное результаты совпадения площадей, занятых снегом составили в среднем 39,1%, а для горного водосбора г/п Вишера-Рябинино – 82,0%. Величина совпадения площадей в среднем составила 60,9%.

В 2004 г., характеризующимся поздним интенсивным снеготаянием, достоверность моделирования на равнинных водосборах составила 68,4%, на южном – 38,5%, на горном – 88,1%, В 2010 г. со средней продолжительностью, но ранним началом снеготаяния (конец марта) величина совпадения площадей на равнинных северных водосборах составила 51,3%, на южном – 24,8%, на горном – 76,1%. Средними сроками начала (первая декада апреля) но протяженным периодом снеготаяния (около месяца) отмечался 2015 г. Для него величина совпадения площадей на равнинных водосборах составила 65,8%, на южном – 58,9%, а на горном – 82,6%.

При работе с материалами дистанционного зондирования часто приходится сталкиваться с негативным влиянием облачности на снимках, связанной с циклонической деятельностью, когда часть, а иногда и вся исследуемая территория закрыта облаками. При наличии даже небольшой (10-20%) «закрытости» водосбора облачностью, это может оказать существенное влияние на результаты расчетов совпадения площадей, занятых снегом, при сравнении модельных карт и космических снимков.

Оценка влияния облачности на результаты расчетов снеготаяния для исследуемых водосборов выполнена с использованием маски облачности «Clouds» *ScanEx Image Processor*, т.е. расчеты проводились для частей водосборов, где облачность полностью отсутствует. Анализ результатов расчетов показал, что достоверность моделирования при этом значительно увеличивается (рис. 3). Для равнинных водосборов г/п Коса-Коса и Кама-Гайны величина совпадения площадей, занятых снегом (среднее значение за все годы) без использования маски облачности составляет 64,9% и 57,4%, а с использованием – 72,5% и 71,9% соответственно. Для южного водосбора г/п Сылва-Подкаменное эти величины составляют 39,1% и 63,9% соответственно. А для горного водосбора г/п Вишера-Рябинино 82,0% и 87,8% соответственно. Увеличение средней величины совпадения площадей при исключении облачности составляет 13,2%.



Рис. 3. Результаты совпадения площадей, занятых снегом на модельных картах и дешифрированных космических снимках за годы с разными метеорологическими условиями и для разных по размеру водосборов бассейна Камского водохранилища

Таким образом, предложенный метод верификации результатов расчетов снеготаяния с данными космического мониторинга позволяет качественно и количественно оценить достоверность моделирования. Разработанная модель весеннего снеготаяния показала хорошие результаты совпадения площадей, занятых снегом на модельных картах и дешифрированных космических снимках в весенний период независимо от площади водосбора и его высотного и широтного расположения.

4. Выполненные ежесуточные расчеты стаявшего и оставшегося снежного покрова по разработанной модели позволили выявить пространственно-временные закономерности снеготаяния на водосборах бассейна Камского водохранилища.

Анализ выполненных модельных расчетов стаявшего и оставшегося снежного покрова показал, что наименьшая продолжительность снеготаяния для всех исследуемых водосборов наблюдалась в 2004 г. и составила в среднем 23 сут. В 2010 г. процесс снеготаяния начался рано (в последней декаде марта), но был средним по продолжительности – 33 сут, несмотря на то, что величина максимального снегозапаса в это год были ниже среднегодовых значений. Наибольшая продолжительность снеготаяния отмечалась в 2015 г., и в среднем составила 41 сут (табл. 2).

Главным фактором, определяющим интенсивность и длительность процесса снеготаяния является ход температуры воздуха в весенний период. Переход температуры воздуха через 0°C к положительным значениям в горных районах происходит на 10–15 дней позже по сравнению с прилегающими равнинами. В начале периода снеготаяния территория водосбора г/п Вишера-Рябинино освобождается от снежного покрова очень медленно – 4% площади за 10 дней (рис. 4а). Поэтому в тот период, когда снежный покров на равнинных водосборах активно стает, на горном водосборе снеготаяние только начинается (рис. 4б).

Таблица 2

Сроки и продолжительность периода снеготаяния для исследуемых водосборов в 2004, 2010 и 2015 гг.

Водосбор	Годы	Отклонение максимального снегозапаса от среднемноголетних значений, %	Даты начала и конца снеготаяния и его продолжительность, сут.
г/п Коса-Коса	2004	-1	28.04-12.05 (15)
	2010	-16	01.04-24.04 (24)
	2015	-10	03.04-05.05 (33)
г/п Кама-Гайны	2004	-3	27.04-17.05 (21)
	2010	-10	29.03-25.04 (27)
	2015	-5	31.03-06.05 (37)
г/п Вишера-Рябинино	2004	9	29.04-02.06 (35)
	2010	-25	31.03-18.05 (49)
	2015	0	07.04-28.05 (51)
г/п Сылва-Подкаменное	2004	-5	28.04-12.05 (15)
	2010	-3	31.03-24.04 (25)
	2015	0	04.04-05.05 (32)

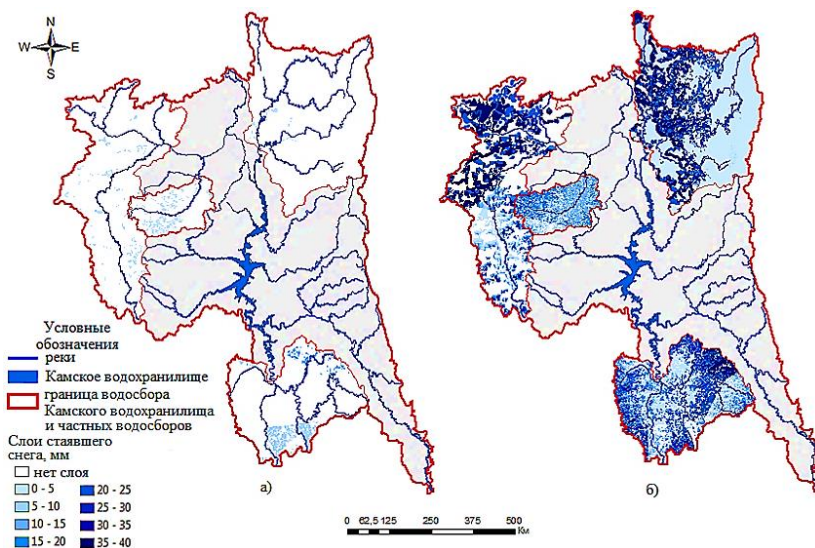


Рис. 4. Пространственное распределение слоя стаявшего снега на водосборах г/п Коса-Коса, Кама-Гайны, Вишера-Рябинино и Сылва-Подкаменное за весенний период 2015 г.: а – в начале (05.04); б – в конце (30.04) периода снеготаяния

Водосборы г/п Коса-Коса и Сылва-Подкаменное раньше других освобождаются от снежного покрова. Для первого из них это обусловлено небольшой площадью и слабой расчлененностью, а для второго – более южным расположением. На меридионально расположенном водосборе г/п Кама-Гайны отчетливо прослеживается проявление широтной

зональности: раньше всего от снежного покрова освобождаются южная и центральная части территории водосбора, а позже – северная. На процесс снеготаяния в северной и западной частях водосбора, где линия водораздела проходит соответственно по Верхне-Камской возвышенности и Северным Увалам также влияет высотная поясность. Для горного водосбора г/п Вишера-Рябинино характерны более поздние сроки начала и окончания снеготаяния из-за совместного влияния широтной зональности и высотной поясности, а также значительной расчленённости рельефа.

Анализ схода снежного покрова со склонов разной экспозиции позволил выявить следующие закономерности. При равномерном покрытии территории снегом в начале весеннего периода, к концу периода снеготаяния на склонах северной экспозиции остается около 70% снега. На равнинных водосборах (г/п Коса-Коса и Кама-Гайны) первыми от снежного покрова освобождаются склоны южной экспозиции – в среднем на 24 дня раньше, чем северные, и на 13 дней раньше, чем западные и восточные склоны. Для южного водосбора г/п Сылта-Подкаменное эти величины составляют 14 и 4 дня соответственно. Разница в сходе снежного покрова на северных и южных склонах для водосбора г/п Вишера-Рябинино составляет 17 дней, при этом западные и восточные склоны освобождаются от снега в среднем на 6 дней раньше северных.

Таким образом, анализ процесса снеготаяния за годы с разными метеоусловиями и на разных по размеру водосборах рек бассейна Камского водохранилища показал, что в среднем продолжительность снеготаяния составляет 33 сут. На равнинных водосборах г/п Коса-Коса и Кама-Гайны эта величина равна в среднем 27 сут., на южном водосборе г/п Сылта-Подкаменное она меньше – 25 сут., а на горном г/п Вишера-Рябинино больше – 45 сут. Средней датой схода снежного покрова для северных склонов является 22 мая, для южных – 30 апреля, и для западных и восточных – 11 мая. Учет влияния экспозиции склонов водосбора позволяет более достоверно оценивать поступление талого стока с его территории.

5. Проведенная оценка эффективности геоинформационной модели для всего водосбора Камского водохранилища подтвердила, что разработанная модель обеспечивает достоверные результаты расчетов площади снегового покрытия и запаса воды в снеге за годы, существенно различающиеся по величине накопленного снегозапаса и метеорологическим условиям весеннего периода.

Хорошие результаты верификации и валидации предложенной геоинформационной модели дают возможность применять ее для оценки процесса снеготаяния на всем водосборе Камского водохранилища. Для этого территория водосбора была разделена на шесть частей, соответствующих водосборам основных притоков Камского

водохранилища. Для всех рассматриваемых водосборов выполнены расчеты процесса снеготаяния за период 2010–2020 гг. и проведена их верификация в местах расположения снегомерных маршрутов, где ведутся наблюдения за снежным покровом (рис. 5).

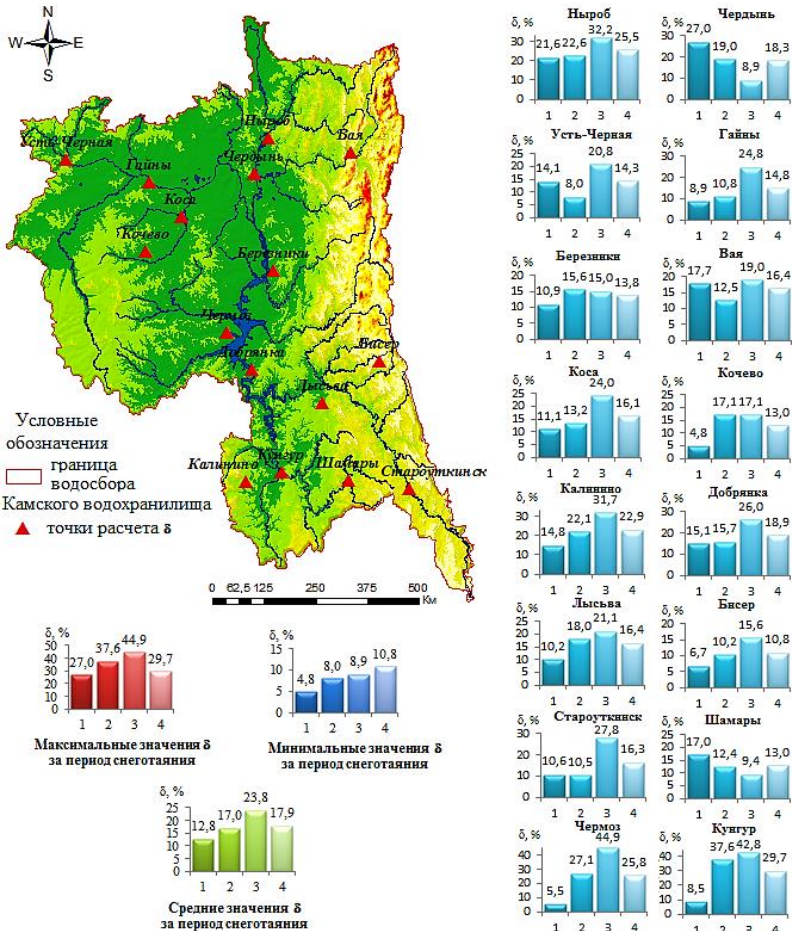


Рис. 5. Результаты верификации геоинформационной модели снеготаяния для водосбора Камского водохранилища за период 2010–2020 гг. (1 – начало снеготаяния; 2 – середина снеготаяния; 3 – конец снеготаяния; 4 – в среднем за период снеготаяния)

Анализ результатов расчетов показал, что общие закономерности процесса снеготаяния, выявленные на модельных водосборах, полностью подтверждаются. Так, для всего водосбора Камского водохранилища среднее расхождение расчетных и измеренных значений снегозапаса (δ) (формула 4) за период снеготаяния составило 17,9%. Пространственное

распределение величин δ по территории водосбора не зависит от широтной и высотной зональности. Среднее наименьшее значение δ (12,8%) характерно для начала периода снеготаяния, а наибольшее (23,8%) – для его окончания, что может быть связано со сложностями проведения наблюдений в этот период.

Расхождения расчетных и измеренных значений снегозапаса (табл. 3) дают представление о том, насколько предложенная модель завышает или занижает значения снегозапаса для водосбора Камского водохранилища в годы с разными погодными условиями весеннего периода. Изменение величины δ в разные годы и для разных пунктов наблюдений носит разнонаправленный случайный характер, что указывает на отсутствие систематической (завышающей или занижающей) ошибки модели.

Таблица 3
Средние за период таяния расхождения расчетных и измеренных значений снегозапаса (δ) для водосбора Камского водохранилища за 2010–2020 гг.

Год МС, г/п	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020
Березники	-27,3	-8,3	-4,5	-19,7	-5,4	-6,6	-9,9	-14,0	-10,4	8,2
Бисер	-3,0	-3,2	-5,4	-0,5	-1,9	-5,8	4,0	27,7	9,1	14,1
Вая	5,0	4,5	16,8	-7,7	–	-4,0	9,2	-38,1	-4,4	10,4
Гайны	-21,1	-32,2	-2,2	-1,0	37,0	-4,8	3,0	5,2	6,8	6,7
Добрянка	-4,1	-4,4	13,1	-39,1	-12,0	22,5	-3,8	-33,0	-44,1	0,3
Калинино	-45,4	30,7	-3,0	–	-7,0	4,6	-18,7	27,2	0,5	-41,4
Коса	-7,1	-21,3	15,6	-6,6	5,2	4,0	13,6	12,6	-6,6	24,0
Кочево	1,9	-18,6	-12,0	-15,1	-7,2	6,1	19,2	15,5	2,0	-2,4
Кунгур	12,8	40,8	28,9	–	-16,4	46,5	40,3	15,3	-12,5	20,0
Лысьва	16,9	14,6	3,6	20,6	0,1	-0,8	-3,6	23,7	13,8	4,1
Ныроб	-4,1	-5,5	0,1	43,6	-9,8	-16,4	-43,7	-15,2	9,9	26,4
Староуткинск	-7,2	10,3	8,2	13,6	–	–	–	7,6	25,7	10,6
Усть-Черная	13,1	31,3	21,6	-5,1	13,7	4,3	4,9	14,2	1,4	14,6
Чердынь	-30,2	-21,2	-18,9	-26,3	-9,2	-12,8	-3,1	-25,0	8,5	4,6
Чермоз	44,6	-5,6	-11,2	17,4	-13,7	28,6	-19,7	55,0	12,9	-49,4
Шамары	0,4	4,0	-21,5	–	–	-17,0	–	6,6	-13,3	-32,0
Среднее δ по модулю	15,3	16,0	11,7	16,6	10,6	12,3	14,1	21,0	11,4	16,8

«–» данные для сравнения отсутствуют

Выполнена оценка эффективности предложенной модели снеготаяния по значениям оставшегося снегозапаса с использованием показателя Нэша-Сатклиффа (*NSE*), рассчитываемого по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

Где Y – фактические значения снегозапаса; \bar{Y} – среднее арифметическое ряда Y_1, \dots, Y_n фактических значений моделируемой характеристики; \bar{Y}_i – получаемые с помощью модели значения снегозапаса.

Показатель NSE составил 0,78, что позволяет отнести модель снеготаяния к категории удовлетворительных. При этом Гидрометцентр РФ рекомендует не ограничиваться показателем Нэша-Сатклиффа, а дополнительно выполнять оценку эффективности методики расчета с использованием других критериев. К ним относится отношение S/σ , где S – среднеквадратическое отклонение смоделированных значений от фактических, а σ – стандартное отклонение. Величина S/σ составила 0,47, что позволяет отнести данную модель снеготаяния к категории хороших.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований достигнута цель диссертации – выявлены пространственно-временные закономерности процесса снеготаяния на водосборе Камского водохранилища с использованием геоинформационного моделирования.

Основные результаты исследования:

1. На основе метода температурных коэффициентов разработана геоинформационная модель снеготаяния, в которой выполняется посуточный расчет слоя стаявшего снега (мм), снегозапаса (мм) и доли оставшегося снежного покрова (%) в точках, соответствующих ячейкам растровой модели водосбора.

2. Предложен метод учета высоты и экспозиции склонов, который существенно уточняет и усовершенствует расчеты снеготаяния. Учет высоты осуществляется введением коэффициентов, в качестве значений которых использованы параметры регрессионных уравнений зависимости максимального снегозапаса от высоты места. Учет влияния склонов разной экспозиции на неравномерность таяния снега также осуществляется введением коэффициентов: для северных – 0,5; для южных – 1,5; для западных, восточных и плоско-равнинной территории – 1,0. При использовании таких коэффициентов наблюдаются наименьшие значения относительной погрешности моделирования снегозапаса и слоя стаявшего снега.

3. Для проверки результатов моделирования пространственного распределения снежного покрова предложен метод верификации модельных карт с данными космического мониторинга на наличие или отсутствие снега в каждой растровой ячейке. При выполнении оверлейных операций установлено оптимальное значение доли оставшегося снега в каждой ячейке растровой модели, которое составило 0,5.

4. Для автоматизированного выделения снежного покрова на залесенной территории использован индекс $NDFSI$, позволяющий определять снежный покров в лесных массивах с большей точностью за счет высокого коэффициента отражения в инфракрасной зоне спектра, что существенно повышает качество верификации расчетов снеготаяния.

5. Валидация разработанной геоинформационной модели снеготаяния в разные годы и для разных по размеру водосборов бассейна Камского

водохранилища показала, что средняя величина совпадения площади снегового покрытия по результатам моделирования и по спутниковым данным для равнинных водосборов до г/п Коса-Коса и Кама-Гайны составила 72,2%, для южного водосбора г/п Сылва-Подкаменное – 63,9%, а для горного водосбора г/п Вишера-Рябинино – 87,8%.

6. Значительное влияние на результаты валидации по спутниковым снимкам оказывает облачность. Выполненные расчеты для участков водосборов, не занятых облачностью, показали, что достоверность моделирования для равнинных водосборов (г/п Коса-Коса и Кама-Гайны) увеличивается в среднем на 11,1%, для южного водосбора (г/п Сылва-Подкаменное) – на 24,7%, а для горного водосбора (г/п Вишера-Рябинино) – на 5,8%.

7. На основе выполненных расчетов снеготаяния для четырех исследуемых водосборов выявлены следующие закономерности. Небольшая площадь и слабая расчлененность водосбора г/п Коса-Коса и южное расположение водосбора г/п Сылва-Подкаменное способствуют быстрому таянию снега. На водосборе г/п Кама-Гайны в процессе снеготаяния прослеживается широтная зональность: раньше всего от снежного покрова освобождаются южная и центральная части территории водосбора, а позже – северная. Для горного водосбора г/п Вишера-Рябинино характерны более поздние сроки начала и окончания снеготаяния, обусловленные широтной зональностью, высотной поясностью и значительной расчленённостью рельефа.

8. На равнинных водосборах (г/п Коса-Коса и Кама-Гайны) средняя продолжительность снеготаяния составляет 27 сут, на южном водосборе г/п Сылва-Подкаменное – 25 сут, а на горном (г/п Вишера-Рябинино) – 45 сут. Раньше всех снег стает на склонах южной экспозиции, через 7 сут на западных и восточных склонах. На северных склонах снег сходит в среднем на 17 сут позже южных.

9. Проверка разработанной геоинформационной модели снеготаяния для всего водосбора Камского водохранилища за период 2010–2020 гг. выполнена путем сравнения рассчитанных значений оставшегося снегозапаса в местах наблюдений на метеостанциях, расположенных в разных частях водосбора, с их фактическими значениями. Для периода снеготаяния величина расхождения δ составила в среднем 17,9%, максимальная разница рассчитанных и измеренных значений снегозапаса (23,8%) характерна для окончания периода снеготаяния, а минимальная (12,8%) – для его начала.

10. Анализ расхождения расчетных и измеренных значений снегозапаса для водосбора Камского водохранилища в годы с разными погодными условиями показал отсутствие систематической (завышающей или занижающей) ошибки и ее разнонаправленный характер. Значение этой ошибки по абсолютной величине за период 2010–2020 гг. изменяется в пределах от 10,6 до 21,0%.

11. Выполнена оценка эффективности предложенной модели

снеготаяния по значениям оставшегося снеговзапаса с использованием показателя Нэша-Сатклиффа (NSE) и величины S/σ . По критерию $NSE = 0,78$ модель снеготаяния относится к категории удовлетворительных, а методика расчета оставшегося снеговзапаса по критерию $S/\sigma = 0,47$ – к категории хороших.

Таким образом, в результате геоинформационного моделирования выявлены пространственно-временные закономерности снеготаяния на водосборе Камского водохранилища, что позволит более детально учитывать поступление талых вод при составлении прогнозов весеннего половодья.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из списка ВАК

1. Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Русаков В.С., Фасахов М.А. Математико-геоинформационное моделирование процесса снеготаяния на речных водосборах Прикамья // Лед и снег. 2022. 62 (1): С. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2076673422010116>.

2. Шайдулина А.А. Расчеты поступления солнечной радиации на склоны в период снеготаяния // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология, 2022. №1: С. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2022.1/9085>.

3. Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А. Пространственно-временные закономерности снеготаяния на речных водосборах Верхней Камы // Географический вестник, 2022. 60 (1): С. 100–112. DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-1-100-112>.

В изданиях, включенных в базу Scopus

4. Kalinin V.G., Rybakova L.O., Shaydulina A.A. Decryption of snow cover on space images in spring period // 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci 834(1): 012026 pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012026>.

5. Kalinin V.G., Shaydulina A.A., Rusakov V.S., Fasakhov M.A. Mathematical and geoinformation modeling of snow melting process in catchment areas in the Kama region. Water Resources, 2022, Vol. 49, Suppl. 1, pp. S80–S89. Pleiades Publishing, Ltd., 2022. Russian Text The Author(s), 2022, published in *Led i Sneg*, 2022, Vol. 62, No. 1, pp. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0097807822070053>.

6. Rusakov S., Kalinin V., Chingayeva E., Shaydulina A. Hydrodynamic Modeling of the Winter Runoff of the Upper Kama // Springer Nature Switzerland AG 2023 E. Isaeva and Á. Rocha (Eds.): Perm Forum 2022, LNNS 622, pp. 1–10, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-28086-3_20.

Статьи в сборниках материалов конференций

7. Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Русаков В.С., Фасахов М.А. К вопросу об учете влияния экспозиции склонов в расчетах снеготаяния // Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках

[Электронный ресурс]: материалы междунар. науч.-практ. оч.-заоч. конф., под общ. ред. П.С. Лопуха. Минск: БГУ, 2021. С. 392–397. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46536061_12100808.pdf.

8. Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Русаков В.С., Фасахов М.А. О верификации модельных расчетов пространственного распределения снежного покрова в период снеготаяния // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов [Электронный ресурс]: тр. VIII Всероссийской научно-практ. конф. Пермь, 2021. С. 99–105. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45959854_91915109.pdf.

9. Шайдулина А.А., Бубнов Е.Д. Оценка погрешности моделирования снегозапаса с применением ГИС-технологий // Географическое изучение территориальных систем [Электронный ресурс]: тр. XV Всероссийской науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных Пермь, 2021. С. 145–149. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46343800_32627389.pdf.

10. Шайдулина А.А. Оценка времени таяния снежного покрова на склонах северной и южной экспозиции средствами ГИС-технологий // Геосфера. Современные проблемы естественных наук: сборник статей Всероссийской науч.-практ. конф. Вып. 14 / отв. ред. А.Ф. Нигматуллин. Уфа: РИЦ БашГУ, 2021. С. 256–260.

11. Шайдулина А.А., Демина В.В. Изменчивость скоростного режима рек северо-западной части водосбора Камского водохранилища в период весеннего половодья // Проблемы экологии Волжского бассейна («Волга-2022») [Электронный ресурс]: тр. 7-й всероссийской науч. конф., вып. 5. Н. Новгород, 2022. С. 1-6. URL: http://вф-река-море.рф/ECO/2022/PDF_ECO/eco57.pdf.

12. Шайдулина А.А., Кетов Р.А. Анализ потерь на испарение и инфильтрацию в период весеннего половодья (на примере водосбора г/п Коса-Коса) // Проблемы экологии Волжского бассейна («Волга-2022») [Электронный ресурс]: тр. 7-й всероссийской науч. конф., вып. 5. Н. Новгород, 2022. С. 1-6. URL: http://вф-река-море.рф/ECO/2022/PDF_ECO/eco58.pdf.

13. Калинин В.Г., Шайдулина А.А. О верификации расчетов снеготаяния с данными наблюдений на метеорологических станциях // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов [Электронный ресурс]: тр. IX Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием. Пермь, 2023. Т. 1. С. 100–104. URL: <https://elis.psu.ru/node/643288>.

Подписано к печати _____ г. Формат 60*84 1/16.
Печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 259/2023
Типография «Новопринт»
614016, г. Пермь, ул. Седова, 7, оф. 110