

ОЦЕНКА СНЕГОЗАПАСОВ В ЗАСУШЛИВОЙ ЗОНЕ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ICON И GFS/NCEP (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА РЕКИ СЕЛЕНГА)

© 2023 г. А. Н. Шихов^{1,2,*}, В. Н. Черных³, А. А. Аюржанаев³,
С. В. Пьянков¹, Р. К. Абдуллин¹

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Москва, Россия

³ Байкальский Институт природопользования Сибирского отделения РАН, Улан-Удэ, Россия

*e-mail: and3131@inbox.ru

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

После доработки 28.01.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2023 г.

Рассматривается применимость данных глобальных численных моделей прогноза погоды ICON и GFS/NCEP для оценки снегонакопления в бассейне р. Селенги, на примере 2020–2022 гг. Валидация результатов выполнена по данным снегомерных съёмок. Получены реалистичные оценки пространственного распределения снегозапасов. Результаты сопоставлены с данными реанализа ERA5–Land и спутниковыми снимками MODIS.

Ключевые слова: бассейн р. Селенги, запас воды в снежном покрове, снегонакопление, сублимация, таяние снега, модель численного прогноза погоды, ICON, GFS/NCEP, снегомерные съёмки

DOI: 10.31857/S2076673423020151, **EDN:** RVHBL5

Снежный покров представляет собой один из важнейших компонентов гидрологического цикла суши. Его ключевой характеристикой является запас воды в снеге (далее — SWE). Оценка пространственного распределения SWE выполняется на основе снегомерных съёмок или методов математического моделирования. Снегомерные съёмки регулярно (каждые 5 или 10 сут) проводятся на сети метеостанций Росгидромета. Однако сеть снегомерных съёмок отличается пространственной неравномерностью, в труднодоступной и горной местности измерения почти не проводятся. Частота проведения снегосъёмок также недостаточна для ряда практических приложений (Турков, Сократов, 2016; Чурюлин, 2018).

Математические модели снежного покрова позволяют получить оценки пространственного распределения SWE с более высоким пространственным и временным разрешением. Они применяются в качестве блоков в распределённых моделях формирования речного стока ECOMAG (Motovilov, 1999; Мотовилов, Гельфан, 2018), “Гидрограф” (Виноградов, Виноградова, 2010) или в моделях поверхности суши (Гусев, Насонова, 2010). Схемы параметризации снежного покрова также необходимы для описания подстилающей поверхности в глобальных и региональных

моделях численного прогноза погоды (далее — ЧПП) (Казакова, 2015; Турков, Сократов, 2016; Чурюлин, 2019).

Для расчёта SWE ключевое значение имеет источник данных об осадках. Станционные данные об осадках имеют те же недостатки, что и данные снегосъёмок, связанные с редкостью и неравномерностью наблюдательной сети. Однако в бассейнах равнинных рек снегонакопление воспроизводится на основе этих данных весьма успешно (Kuchment et al., 2000, 2010; Мотовилов, Гельфан, 2018). Для горной местности предпочтительнее использовать прогнозы осадков по моделям ЧПП (Queno et al., 2016). Также применяются различные комбинированные подходы, к числу которых относится разработанная в ФГБУ “Гидрометцентр России” технология расчета снегонакопления SnoWE, используемая для расчёта SWE на всей территории России (Казакова, 2015; Kazakova et al., 2015; Чурюлин и др., 2018, 2019).

Расчеты снегонакопления с применением данных моделей ЧПП проводится для крупных речных бассейнов, в которых вклад снегового половодья в годовой объём стока достигает 50% и более (Pyankov et al., 2018; Пьянков и др., 2019), или для бассейнов горных территорий (Bellaire et al., 2011; Quéno et al., 2016). Для речных бассейнов се-

миаридной зоны с маломощным и неустойчивым снежным покровом опыт таких исследований незначителен.

В работе оценивается возможность применения данных глобальных моделей ЧПП ICON (Германия) и GFS/NCEP (США) для расчёта снегонакопления в бассейне р. Селенги, который характеризуется малым количеством осадков в холодный период, низкой плотностью наблюдательной сети, сложным рельефом и разнообразным растительным покровом. Оценка снегонакопления в бассейне р. Селенги имеет значение не столько для прогноза весеннего половодья (на которое приходится лишь незначительная часть годового стока), сколько с точки зрения условий для кочевого скотоводства (Сандакова, Дангасурен, 2014), а также для прогноза пожарной опасности в весенний период (Kukavskaya et al., 2016; Bigio et al., 2022).

Характеристика бассейна р. Селенги. Селенга — крупнейшая река, впадающая в оз. Байкал и обеспечивающая до половины ежегодного притока воды в него (Гармаев, Христофоров, 2010). Площадь её бассейна составляет 447 тыс. км², из которых две трети приходится на территорию Монголии. Большая площадь бассейна в совокупности со сложным рельефом территории (перепад высот — от 600 до 3000 м) обуславливают значительное разнообразие физико-географических условий (Миллионщикова, 2018). Бассейн расположен в таежной, лесостепной, степной и сухостепной зонах, хорошо проявляется высотная зональность. Леса покрывают 27.7% площади бассейна (рис. 1).

Бассейн расположен в зоне резко континентального климата. Наибольшее количество осадков (400–500 мм) выпадает в высокогорьях Хангайско-Хэнтэйской горной области, а наименьшее — в долинах рек Орхона, Туула и Селенги (200–250 мм) (Миллионщикова, 2018). Важная особенность климата — 80–90% годовой суммы осадков выпадает в жидком виде. Лишь в самой северной части бассейна количество осадков в виде снега достигает 30–50% годовой суммы. Основной источник питания рек — дождевые осадки (Frolova et al., 2017).

Снежный покров в бассейне Селенги в основном маломощный, его пространственное распределение неравномерно. По данным реанализа ERA5–Land с пространственным разрешением 9 км (Muñoz-Sabater et al., 2021), средний по площади бассейна запас воды в снежном покрове на 28 февраля (осредненный за период 1991–2020 гг.) составляет 24 мм, а разброс этих значений в отдельные годы — от 10 до 37 мм. В равнинной степной части бассейна норма максимального снегозапаса по данным ERA5 не превышает 20 мм, а в горных районах на севере (южный склон Хамар-

Дабана) и на востоке (в бассейне р. Чикой) достигает 50 мм и более.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Методика расчёта снегонакопления в бассейне р. Селенги. Моделирование процесса снегонакопления выполнено на основе адаптации эмпирической методики, ранее разработанной для бассейна р. Камы (Пьянков и др., 2019). В холодный период 2020/21 г. применялись два источника данных об осадках (глобальная модель ЧПП ICON и данные метеостанций), а в холодный период 2021/22 г. — данные глобальной модели ЧПП GFS/NCEP.

Модели ЧПП ICON и GFS разработаны метеослужбой Германии и Национальным центром атмосферных исследований США (NCEP) соответственно. Их основные характеристики приведены в обзоре (WGNE Overview, 2020). В расчётах использовалась выходная продукция моделей — температуры воздуха и точки росы на высоте 2 м над поверхностью и на изобарической поверхности 700 гПа, скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью и осадки, накопленные за 24 ч. Эта продукция предоставляется на редуцированных широтно-долготных сетках с размером ячейки $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ (модель ICON) и $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (модель GFS/NCEP). Данные об осадках использовались за сроки 3 и 27 ч от времени запуска модели, чтобы обеспечить сопоставимость с наблюдениями метеостанций. По модели ICON получены непосредственно накопленные осадки (переменная *tot_prec*), а по модели GFS — интенсивность осадков (переменная *prate_surface*).

Для регулярного получения данных моделей ЧПП ICON и GFS/NCEP использованы программные инструменты, описанные в работе (Shikhov et al., 2021). Загрузка выбранных переменных (температура, влажность воздуха и количество осадков) выполняется два раза в сутки. Полученный архив прогностических данных, преобразованных в формат Geotiff (с заблаговременностью прогнозов 27 ч), доступен по адресу <http://84.201.155.104/>.

В модели расчёта характеристик снежного покрова учитываются основные приходящие (атмосферные осадки с учетом их фазы) и расходные (снеготаяние, сублимация с поверхности снега, перехват осадков растительностью с последующей сублимацией) составляющие его баланса. Расчёт пространственного распределения метеоэлементов (среднесуточных значений температуры и влажности воздуха на высоте 2 м над земной поверхностью, скорости ветра на высоте 10 м, сумм осадков с учётом их фазы) выполняется на основе комбинирования данных моделей ЧПП и наблюдений метеостанций (Pyankov et al.,

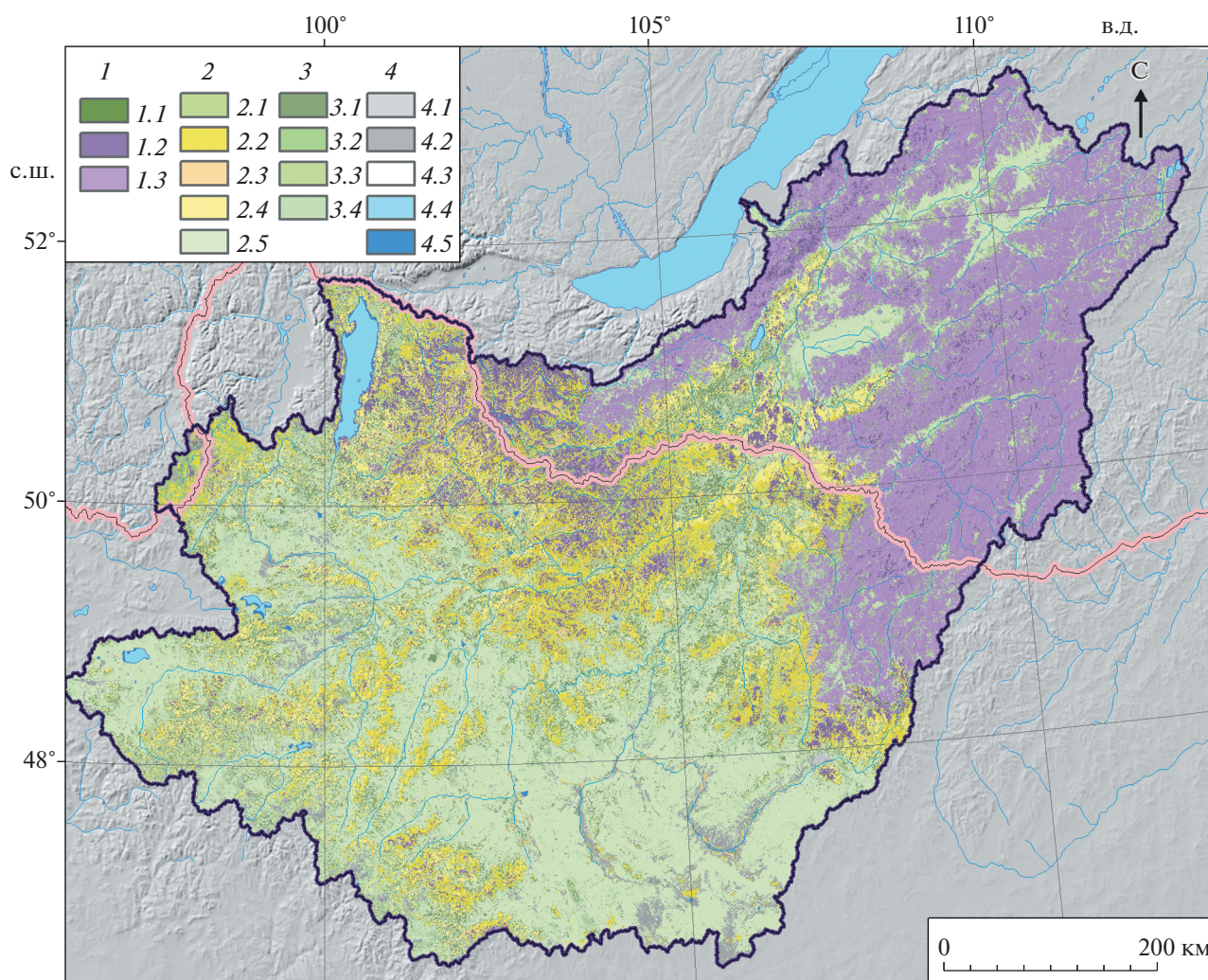


Рис. 1. Типы подстилающей поверхности в бассейне р. Селенги:

1 – лесопокрытые территории (1.1 – лиственные леса; 1.2 – смешанные и хвойные леса; 1.3 – смешанные и хвойные редколесья); 2 – нелесопокрытые территории (2.1 – пойменная растительность; 2.2 – травянистая растительность; 2.3 – орошаемые пахотные земли; 2.4 – богарные пахотные земли; 2.5 – разреженная растительность); 3 – мозаика лесопокрытых и нелесопокрытых территорий (3.1 – пахотные земли (50–70%) и луга (30–50%); 3.2 – леса, кустарники (50–70%) и луга (20–50%); 3.3 – луга (50–70%) и леса, кустарники (20–50%); 3.4 – луга, кустарники (50–70%) и пахотные земли (20–50%); 4 – прочее (4.1 – городская застройка; 4.2 – участки, лишенные растительности; 4.3 – нет данных и облачность; 4.4 – снега и ледники; 4.5 – водная поверхность).

Fig. 1. Types of underlying surface in the Selenga river basin.

1 – Forest-covered areas (1.1 – deciduous forests; 1.2 – mixed and coniferous forests; 1.3 – mixed and coniferous woodlands); 2 – Treeless areas (2.1 – floodplain vegetation; 2.2 – herbaceous vegetation; 2.3 – Post-flooding or irrigated croplands (or aquatic); 2.4 – rainfed croplands; 2.5 – sparse vegetation); 3 – Mosaic forest and covered, treeless areas (3.1 – arable land (50–70%) and grasslands (30–50%); 3.2 – forests, shrubs (50–70%) and grasslands (20–50%); 3.3 – grassland (50–70%) and forests, shrubs (20–50%); 3.4 – grassland, shrubs (50–70%) and croplands (20–50%); 4 – Other (4.1 – urban areas; 4.2 – bare areas; 4.3 – no data and cloudiness; 4.4 – snow and ice; 4.5 – water surface).

2018; Пьянков и др., 2019). Так, для среднесуточной температуры воздуха и дефицита влажности производится интерполяция данных метеостанций с коррекцией для каждой ячейки цифровой модели рельефа (далее – ЦМР), чтобы учесть изменение этих величин с высотой местности. Вертикальный градиент рассчитывается на основе разности приземных значений этих величин и данных моделей ЧПП, полученных для изобари-

ческой поверхности 700 гПа (которая приблизительно соответствует высшим точкам бассейна р. Селенги). Среднесуточная скорость ветра рассчитывалась по моделям ЧПП, с введением поправочных коэффициентов на тип растительного покрова, предложенных в работе (Корень, 1991).

Для прогностических полей осадков принята схема ГИС даунскейлинга (повышения детально-

сти), основанная на предположении о постоянстве увеличения осадков с высотой местности, выраженного в относительных единицах, т.е. в процентах на 100 м высоты (Пьянков и др., 2019). Для этого в каждой ячейке расчётной сетки вычислялась разность между ЦМР, используемой в модели прогноза погоды (для каждой модели ЦМР несколько различаются), и более детальной “истинной” ЦМР. На основе разности высот в каждой ячейке вычислялись поправочные коэффициенты к полученному по модели количеству осадков. Значение вертикального градиента осадков было принято равным 10% на 1000 м высоты.

Далее производится расчёт характеристик снежного покрова (SWE, площади снежного покрытия) на основе полученных данных. Выходные данные имеют суточный шаг по времени и пространственное разрешение 3000 м (что позволяет уменьшить временные затраты на вычисления). Вычисления выполняются в геоинформационной системе ArcGIS 10*, с помощью последовательного запуска ряда скриптов и моделей геообработки, использующих средства интерполяции и растровой алгебры. Адаптация ранее разработанной методики для условий бассейна р. Селенги состояла в следующем.

1. В качестве исходной карты растительности — продукт GlobCover—2009 (Arino et al., 2008), поскольку эти данные доступны для всей территории бассейна р. Селенги.

2. Значительная часть площади бассейна расположена на высотах 1500–3000 м, поэтому для расчета вертикального градиента температуры воздуха используются поля температуры воздуха на изобарической поверхности 700, а не 850 гПа, как для бассейна р. Камы.

3. Интенсивность снеготаяния рассчитывается по схеме (Гордеев, 2012), предложенной для крупных водосборов с редкой сетью наблюдений. В данной схеме оцениваются два основных потока тепла, определяющих интенсивность снеготаяния: теплообмен с атмосферой и суммарная солнечная радиация:

$$M = K_1\theta + K_2(Q + q), \quad (1)$$

где M — интенсивность снеготаяния; θ — среднесуточная температура воздуха, $Q + q$ — суммарная радиация в условиях ясного неба ($\text{мДж/м}^2 \text{сут}^{-1}$), поступление которой рассчитывается средствами ГИС SAGA на основе цифровой модели рельефа по алгоритму (Wilson, Gallant, 2000).

Значения коэффициентов K_1 и K_2 определяют вклад адвективной и радиационной составляющих снеготаяния. Коэффициент K_1 представляет собой температурный коэффициент стаивания и принят равным $2 \text{ мм/}^{\circ}\text{C} \times \text{сут}$. Значение K_2 при-

нято равным 0.3, согласно (Гордеев, 2012). Относительно низкие значения K_1 обусловлены значительным дефицитом влажности воздуха, характерным для данного региона, что способствует снижению интенсивности таяния (Кузьмин, 1961). Также введены поправки, учитывающие влияние типов растительного покрова. Так, K_1 имеет минимальные значения для темнохвойного леса ($1 \text{ мм/}^{\circ}\text{C} \times \text{сут}$), а максимальные — для открытой местности ($2 \text{ мм/}^{\circ}\text{C} \times \text{сут}$). Коэффициент ослабления солнечной радиации, согласно (Кузьмин, 1961) имеет минимальное значение для темнохвойного леса (0.25).

4. Сублимация с поверхности снега рассчитывается по известной формуле П.П. Кузьмина (Кузьмин, 1961):

$$E = 0.18 + 0.098U_{10}(e_2 - e_0), \quad (2)$$

где U_{10} — среднесуточная скорость ветра на высоте 10 м; e_2 — парциальное давление водяного пара на высоте 2 м, гПа; e_0 — парциальное давление водяного пара, рассчитанное по температуре поверхности снега, гПа. Температура поверхности снега принимается равной температуре воздуха, если она ниже 0°C , и равной нулю, если она выше 0°C .

Расчёт перехвата твёрдых осадков древесной растительностью выполняется на основе продукта обработки спутниковых данных MODIS — MOD15A2 (8-day LAI and FPAR) с пространственным разрешением 1000 м, полученного с веб-сервиса NASA (<https://ladsweb.modaps.eos-dis.nasa.gov/>). Этот продукт содержит значения листового индекса LAI — отношения площади листьев (хвой) к площади земной поверхности (Myneni et al., 2002). Данные загружены за февраль 2021 г., чтобы учесть только вклад древесной растительности, которая формирует перехват осадков в зимний период. Интенсивность перехвата твердых осадков растительностью пропорциональна значению LAI (Kuchment et al., 2010), а интенсивность сублимации с крон деревьев — дефициту влажности. На этом основано простое соотношение (Карпечко, Бондарик, 2010), использованное для расчета сублимации твердых осадков с крон деревьев:

$$E_i = k \cdot d \cdot LAI \cdot n, \quad (3)$$

где LAI — листовый индекс; n — число дней, за которые производился расчёт; k — эмпирический коэффициент, принятый равным 0.065 (Карпечко, Бондарик, 2010).

Таким образом, при расчёте снегонакопления и снеготаяния используются несколько параметров: *коэффициенты стаивания и поправки*, принятые для разных типов растительного покрова, описанные выше; *коэффициенты ослабления скорости ветра* в зависимости от типа растительности (от 0.15 для темнохвойных лесов до 1.0 для от-

крытой местности, согласно (Корень, 1991); коэффициенты *ослабления притока солнечной радиации* в зависимости от типа растительности (от 0.25 для темнохвойных лесов до 1.0 для открытой местности, согласно (Кузьмин, 1961); коэффициент *водоудерживающей способности снега*, принятый равным 15–20% от накопленного SWE, для лесопокрытой территории и для открытой местности соответственно. Такие значения ранее применялись в расчётах для бассейна Камы (Ryankov et al., 2018). Водоудерживающая способность снега определяется его плотностью и структурой, и оказывает существенное влияние на временную задержку между началом таяния снега и началом водоотдачи. Учитывая незначительную величину снегозапаса на большей части бассейна Селенги, можно считать такую приближённую оценку водоудерживающей способности допустимой.

Снегомерные съёмки в бассейне р. Селенги. Для верификации результатов расчёта снегозапасов использованы данные снегомерных съёмок, проведенных во второй половине зимы 2021 г. (28–31 января и 15 февраля) и 2022 г. (18–25 февраля) в российской части бассейна р. Селенги. Маршруты съёмок проходили в разных ландшафтных условиях, пересекали горные хребты и межгорные котловины таким образом, чтобы обеспечить максимальный охват российской части территории бассейна р. Селенга. Съёмкой охвачены крупные межгорные котловины со степными и лесостепными ландшафтами, средневысотные горные хребты, покрытые тайгой, долины крупных рек, малые водосборные бассейны. Работы проводились по стандартным методикам с использованием снегомерных реек и весовых снегомеров. В тех случаях, когда массу снега невозможно было оценить при помощи весовых снегомеров, на снегомерной точке отбирались пробы, которые завешивались в условиях стационара на электронных весах. Общая протяженность снегомерных маршрутов составила 102 км. Наблюдения на точках включали описание общего характера снежного покрова, его состояние под влиянием природных процессов и выпаса скота.

В конце января–феврале 2021 г. измерения проведены на 11 маршрутах (около 200 точек). Расстояние между точками на маршрутах составляло от 300 до 1000 м, тогда как шаг сетки, использованной при расчёте снегонакопления в бассейне р. Селенги, был равен 3000 м. В 2022 г. снегомерные съёмки повторно выполнены на большинстве маршрутов, но плотность точек была значительно уменьшена (общее их число составило 51). Таким образом, данные снегосъёмок были приведены в соответствие с пространственным разрешением модели. При этом проведены снегосъёмки на одном новом маршруте вдоль

р. Куйтунка, но исключены маршруты в нижнем течении р. Селенги и на хр. Улан-Бургасы.

На распределение SWE вдоль снегомерных маршрутов существенно влияют локальные вариации снегонакопления, обусловленные ветровым переносом и характером мезорельефа. Эти особенности не воспроизводятся моделью вследствие слишком грубого шага сетки (3000 м). Однако данные снегосъёмок позволяют получить общее представление о степени корректности результатов моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка достоверности расчёта сумм осадков по моделям ЧПП за холодный период. Для оценки достоверности данных об осадках, полученных по моделям ЧПП, проводилось сопоставление их месячных сумм с данными наблюдений по 59 метеостанциям, из которых 35 находятся в пределах бассейна р. Селенги (табл. 1). С данными наблюдений сопоставлены исходные (до проведения процедуры даунскейлинга) прогностические поля осадков. Это обусловлено тем, что метеостанции в бассейне Селенги расположены в основном в широких долинах рек и межгорных котловинах, где разность высот по двум ЦМР (истинной и полученной из модели ЧПП) не превышает 100 м. Следовательно, и количество осадков при учёте вертикального градиента изменяется незначительно.

В период с октября по март осадки выпадали в основном в твёрдом виде. Так, в 2020 г. снежный покров в бассейне р. Селенги впервые сформировался 10 октября и в конце октября наблюдался на большей части бассейна. В период проведения снегомерных съёмок с конца января до середины февраля снежный покров в российской части бассейна наблюдался повсеместно. Разрушение его началось в конце первой декады марта за счёт интенсивных дневных оттепелей. В 2021 г. формирование временного снежного покрова также наблюдалось в первой половине октября, а устойчивый снежный покров на большей части водосбора установился в декабре. В период проведения снегомерных съёмок снежный покров в российской части бассейна также наблюдался повсеместно.

В двух моделях ЧПП в течение всего рассматриваемого периода наблюдается тенденция к завышению среднего по бассейну количества осадков, причем в 2021–2022 гг. по модели GFS/NCEP завышение было более существенным, чем по модели ICON. Наиболее существенно данная тенденция была выражена в октябре–ноябре и в феврале, когда сумма осадков по модели ICON в пределах бассейна р. Селенги оказалась более чем в два раза выше, чем по данным

Таблица 1. Оценка прогноза месячных сумм осадков в холодный период по моделям ICON и GFS/NCEP на территории бассейна р. Селенги

Параметр	10.2020	11.2020	12.2020	01.2021	02.2021	10.2021	11.2021	12.2021	01.2022	02.2022
Модель ICON Модель GFS/NCEP										
Среднее наблюдаемое количество осадков, мм	16.0/11.1 —	10.1/6.3 —	6.2/3.4 —	10.6/7.9 —	6.1/4.4 —	2.4/1.4 2.4/1.4	8.1/6.1 8.1/6.1	6.1/4.1 6.1/4.1	6.2/5.1 6.2/5.1	3.1/1.7 3.1/1.7
Среднее количество осадков по модели ICON, мм	24.2/18.0 —	13.3/11.1 —	7.8/5.8 —	11.7/1.2 —	12.5/11.7 —	4.1/3.5 4.5/3.5	10.2/7.4 10.0/6.8	7.2/6.0 8.8/6.4	6.5/6.1 7.2/6.1	4.3/4.0 7.0/6.1
Средняя разность, мм	8.2/6.9 —	3.3/4.8 —	1.6/2.4 —	1.1/3.4 —	6.4/7.3 —	1.8/2.1 2.1/2.0	2.1/1.3 1.9/0.7	1.0/1.8 2.6/2.3	0.3/0.9 1.1/0.9	1.2/2.2 3.9/4.1
RMSE, мм	16.1/13.5 —	12.9/7.9 —	5.2/4.2 —	9.3/6.0 —	8.2/8.9 —	4.9/3.8 5.5/3.8	7.6/4.1 9.0/4.4	4.6/3.7 6.6/4.1	3.9/3.3 4.0/3.1	4.1/3.5 6.6/5.7

Прочерк — отсутствие данных.

наблюдений (хотя в абсолютном выражении это завышение составляет всего 2–8 мм). По модели GFS/NCEP в феврале 2022 г. завышение было более чем трехкратным, но при этом среднее фактическое количество осадков по бассейну составило всего 1.7 мм. В то же время в декабре–январе количество осадков по обеим моделям завышается менее существенно (на 20–60%). Похожие тенденции при использовании этих же моделей (завышение накопленного количества осадков, в начале и в конце холодного периода) были ранее выявлены для территории Урала (Пьянков и др., 2019; Shikhov et al., 2021). Вследствие систематического завышения, а также локальных расхождений между расчётным и фактическим количеством осадков среднеквадратичная ошибка (RMSE) в большинстве месяцев (за исключением ноября 2020, декабря и января 2020–2022 гг.) оказалась больше, чем среднее наблюдаемое количество осадков на метеостанциях (см. табл. 1). Однако реальное количество твердых осадков по данным метеостанций может сильно недооцениваться из-за выдувания, особенно в степной зоне (Гаврилова, 2010).

Оценка достоверности расчёта запаса воды в снеге (SWE). Результаты расчёта SWE на момент проведения снегомерных съёмок в бассейне р. Селенги (15.02.2021 и 25.02.2022) показаны на рис. 2 и 3.

Достоверность результатов оценивалась путём сравнения расчётных значений SWE с вышеописанными данными снегомерных съёмок, выполненных в российской части бассейна р. Селенги (табл. 2). В конце января — феврале 2021 г. в степ-

ной зоне (в долинах рек Селенга, Джиды, Хилок и Чикой) расчётный SWE был меньше, чем по данным снегомерных съёмок, несмотря на завышение количества осадков по модели ICON. Это может быть обусловлено переоценкой интенсивности сублимации с поверхности снега при расчёте по формуле П.П. Кузьмина. Важно отметить, что в районе проведения снегомерных съёмок завышение количества осадков по модели ICON было менее выражено, чем в среднем по бассейну. Абсолютные значения SWE на этих степных маршрутах очень малы (в среднем 8–12 мм).

На наиболее протяжённом снегомерном маршруте вдоль хребтов Барской и Заганский (см. рис. 2, табл. 2) расчётный SWE оказался существенно больше измеренного, что соответствует пространственному распределению выпавших осадков как по данным метеостанций, так и по моделям ЧПП. При этом расчёт SWE на основе интерполяции данных метеостанций дал более высокие значения, в сравнении с расчётом на основе данных модели ICON.

В то же время на двух маршрутах, где среднее измеренное значение SWE превышало 50 мм (нижнее течение р. Селенги и хр. Улан-Бургасы), расчётный SWE по данным модели ICON был несколько выше измеренного. Результат расчёта SWE на основе интерполяции данных об осадках с метеостанций для этих двух маршрутов имеет низкую точность (SWE оказался в три раза меньше, чем по данным снегомерных съёмок).

Отношение RMSE к среднему значению SWE в 2021 г. на разных снегомерных маршрутах составило от 0.43 до 0.82 (среднее 0.55) при расчёте на

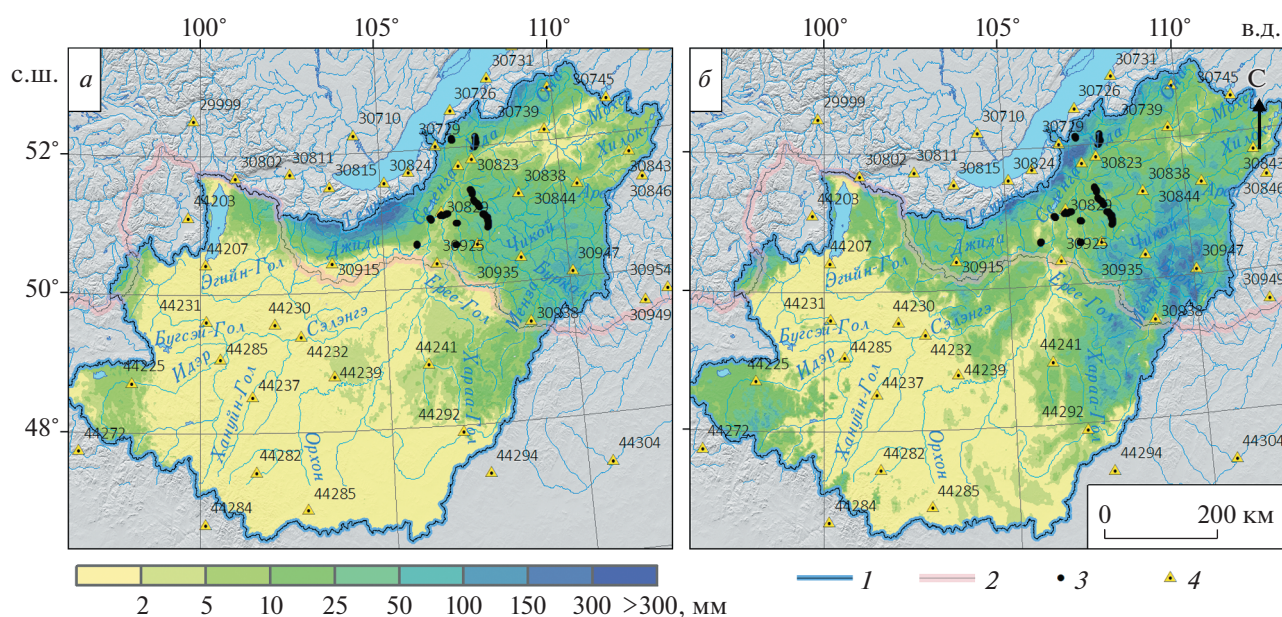


Рис. 2. Расчётный запас воды в снежном покрове в бассейне р. Селенги в период проведения снегосъёмок в 2021 г. (15.02.2021) на основе интерполяции данных метеостанций (а) и данных модели атмосферы ICON (б): 1 – границы бассейна; 2 – границы Российской Федерации; 3 – точки, в которых проводились снегомерные съёмки; 4 – метеостанции.

Fig. 2. SWE in the Selenga river basin for the period of snow surveys in 2021 (15.02.2021), calculated based on interpolation of weather station data (а) and according to the ICON atmospheric model data (б): 1 – basin boundaries, 2 – RF borders; 3 – snow survey locations; 4 – weather stations.

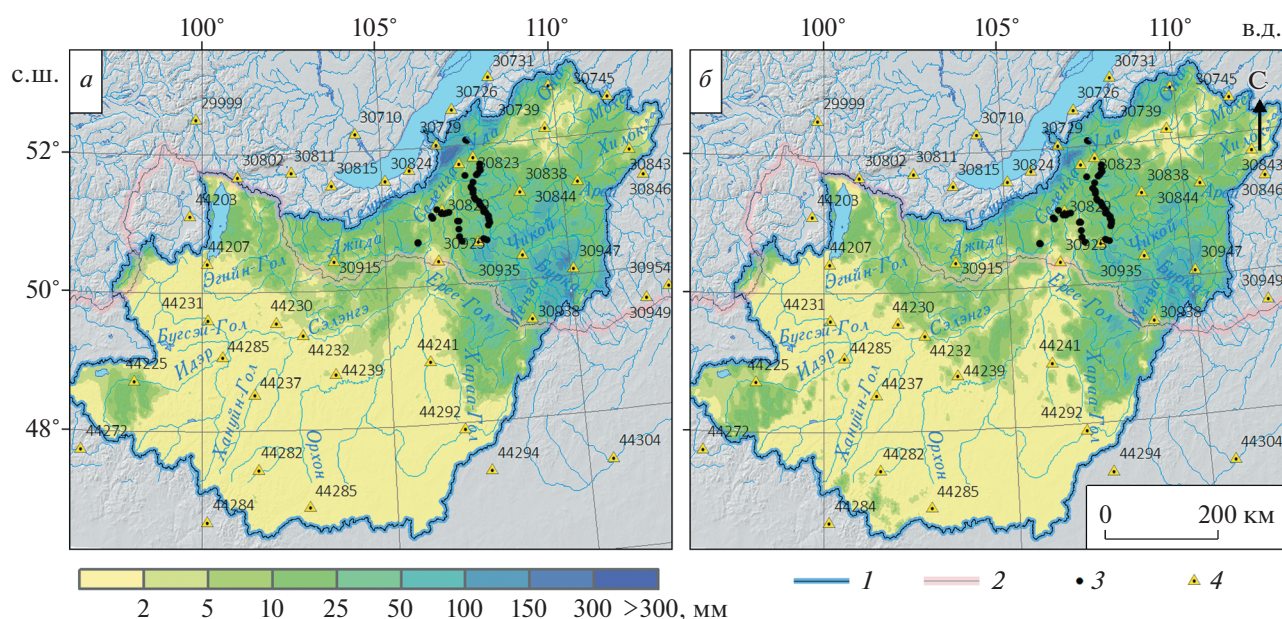


Рис. 3. Расчётный запас воды в снежном покрове в бассейне р. Селенги в период проведения снегосъёмок в 2022 г. (25.02.2022) на основе интерполяции данных метеостанций (а) и данных модели атмосферы ICON (б): 1 – границы бассейна; 2 – границы Российской Федерации; 3 – точки, в которых проводились снегомерные съёмки; 4 – метеостанции.

Fig. 3. SWE in the Selenga river basin for the period of snow surveys in 2022 (25.02.2022), calculated based on interpolation of weather station data (а) and according to the ICON atmospheric model data (б): 1 – basin boundaries; 2 – RF borders; 3 – snow survey locations; 4 – weather stations.

Таблица 2. Сопоставление результатов расчётов SWE в бассейне р. Селенги с данными маршрутной съёмки в 2021/22 г.

Снегомерный маршрут (число точек)	Абс. высота, м (мин./среднее/макс.)	Измеренный SWE, мм (мин./среднее/макс.)	Расчетный SWE, мм (минимум/среднее/максимум)		
			RMSE (мм)		
			по данным модели ICON	по данным метеостанций	по данным модели GFS
2021 г.					
хр. Барской (18)	784/879/1008	6/19/35	<u>10/14/19</u> 8.9	<u>10/14/19</u> 8.8	—
Тугнуйская котловина (20)	640/716/897	2/10/23	<u>7/10/16</u> 5.0	<u>14/17/21</u> 8.8	—
хр. Заганский (50)	722/856/1092	6/20/46	<u>10/26/37</u> 11.5	<u>22/32/38</u> 14.7	—
Бичурская котловина (26)	600/604/610	3/6/11	<u>7/7/7</u> 2.6	<u>4/4/4</u> 2.7	—
Долины р. Хилок, Чикой (34)	524/608/724	3/9/18	<u>5/9/15</u> 5.4	<u>1/3/6</u> 6.2	—
Нижнее течение р. Селенги (12)	—	29/52/109	<u>57/63/66</u> 23.2	<u>17/17/19</u> 40.7	—
Хр. Улан-Бургасы (15)	—	29/73/164	<u>52/83/106</u> 37.5	<u>20/26/33</u> 64.4	—
Долина р. Селенга (15)	541/545/555	0/5/11	<u>3/3/3</u> 3.93	<u>4/5/6</u> 3.24	—
Долина р. Джиды (10)	582/587/595	8/13/17	<u>5/6/7</u> 7.5	<u>3/4/5</u> 8.7	—
2022 г.					
хр. Барской и Заганский (13)	722/854/1092	19/26/34	<u>13/20/36</u> 11.4	<u>16/23/34</u> 3.1	<u>16/25/41</u> 4.8
Тугнуйская котловина (5)	640/735/832	20/21/26	<u>11/12/15</u> 10.0	<u>20/22/25</u> 5.1	<u>15/17/20</u> 4.7
Долины рек Хилок, Чикой, Селенга, Джиды (24)	524/595/752	7/14/20	<u>1/8/23</u> 8.6	<u>1/6/14</u> 6.8	<u>3/10/35</u> 5.4
Долина р. Куйтунка (7)	515/677/874	20/27/49	<u>10/15/25</u> 17.6	<u>12/15/21</u> 9.1	<u>13/23/35</u> 8.9

Прочерк — отсутствие данных.

основе данных модели ICON, и от 0.45 до 0.90 (среднее 0.70) при расчете на основе данных метеостанций. Таким образом, расчёт по данным модели ICON обеспечивает существенно более высокую точность воспроизведения SWE.

В холодный период 2021 и 2022 г. расчёты SWE проводились на основе данных моделей ЧПП ICON и GFS/NCEP, а также по данным об осадках, интерполированным с сети метеостанций (см. табл. 2). Количество точек измерений SWE в 2022 г. было в 4 раза меньше, чем в 2021 г. В связи с этим некоторые маршруты, близкие по характе-

ристикам и пространственному положению, были сгруппированы.

В 2022 г., в отличие от 2021 г., отмечено систематическое значительное занижение SWE при расчетах по данным модели ICON (см. табл. 2), несмотря на то, что количество осадков в среднем по бассейну по модели оказалось выше, чем по данным метеостанций. Это связано, прежде всего, с особенностями пространственного распределения осадков. В среднем по бассейну количество осадков было завышено моделями, но по ближайшим к снегомерным маршрутам метео-

Таблица 3. Сопоставление расчётных значений SWE с данными ERA5–Land и результатами снегомерных съёмок (по всему бассейну р. Селенги)

Дата	Снегозапас (мм) / RMSE (мм)				
	по данным снегосъёмки	по данным модели ICON	по данным модели GFS	по данным метеостанций	ERA5-Land
15.02.2021	20	22/13.8	–/–	16/22.2	37/27.6
25.02.2022	21	13/11.3	18/8.2	14/11.0	26/10.3
Средние значения SWE по всей площади бассейна (мм)					
15.02.2021	–	19	–	11	24
25.02.2022	–	10	11	4	17

Прочерк – отсутствие данных.

станциям Бичура и Мухоршибирь – занижено. Также может иметь место завышение интенсивности сублимации со снежного покрова, рассчитанной по формуле П.П. Кузьмина. При использовании данных об осадках по модели GFS/NCEP получены более корректные значения SWE. В среднем по бассейну данная модель сильно завышала количество осадков, но в районе, где проводились снегосъёмки, завышение было незначительным, что обусловило приемлемую точность расчёта SWE.

Сопоставление расчётных значений SWE с данными реанализа ERA5–Land. Результаты расчётов SWE по вышеописанной методике, а также данные снегосъёмки были сопоставлены со значениями SWE, полученными по данным реанализа ERA5e–Land за даты проведения снегосъёмки (15.02.2021 и 25.02.2022 г.). Данные ERA5–Land имеют исключительно высокое для реанализов пространственное разрешение (9 км) и покрывают период с 1950 по 2022 г., что обеспечивает их применимость для изучения климатических характеристик снежного покрова (Muñoz-Sabater et al., 2021).

В 2021/22 г. среднее значение SWE по данным ERA5 оказалось завышенным в сравнении с данными снегосъёмки и с результатами моделирования, причём в 2021 г. завышение было более значительным (в среднем почти в два раза, в сравнении с данными снегомерной съёмки). Средний по площади бассейна снегозапас по данным ERA5–Land также оказался существенно выше, чем по результатам моделирования 2021/22 г. (табл. 3). RMSE расчётного снегозапаса по данным реанализа (рассчитанная на основе сравнения с данными снегосъёмки) в 2021 г. была существенно выше, чем по результатам моделирования на основе данных модели ICON, а в 2022 г. – меньше, чем при расчёте по данным модели ICON.

Распределение снегозапасов по площади бассейна по данным ERA5–Land оказалось более сглаженным, чем по результатам изложенных вы-

ше ГИС– расчётов, что обусловлено более низким пространственным разрешением реанализа в сравнении с данными моделей ЧПП. Наиболее значительное завышение SWE отмечается в степной зоне. Так, в 2021 г. SWE по данным ERA5–Land в долинах рек Чикой, Хилок, Селенга был в 3–6 раз (на 10–20 мм) больше, чем по данным снегосъёмки. В то же время для горных участков, в частности хр. Улан-Бургасы, SWE по данным реанализа оказался существенно меньше, чем по данным измерений и моделирования.

Оценка достоверности расчёта площади снежного покрытия по данным MODIS. Помимо данных снегомерных съёмок, для валидации результатов моделирования использованы спутниковые снимки Terra MODIS за вторую половину холодного периода, полученные в условиях отсутствия облачности над бассейном р. Селенги (в 2021 г. – за 6 марта, в 2022 г. – за 23 февраля). Учитывая то, что большая часть площади бассейна не покрыта лесом, площадь снежного покрытия определялась по нормализованному разностному снежному индексу NDSI (Hall et al., 1995) с разными пороговыми значениями для безлесных (0.4) и лесопокрытых (0.2) территорий. Аналогичный подход используется при оценке площади снежного покрытия на водосборах крупных рек Сибири (Rotasko, Burakov, 2017). По расчётным данным площадь снежного покрытия определялась как территория, где SWE превышает 2 мм, аналогичный подход использовался и для данных реанализа ERA5–Land (рис. 4).

При сравнении со спутниковыми данными в 2022 г. выявлены занижение расчётной площади снежного покрытия (более существенное – по данным модели GFS/NCEP) и значительное завышение этой величины по данным ERA5–Land. Основные расхождения наблюдаются в монгольской части бассейна, где по данным ERA5–Land площадь снежного покрытия завышена, а по результатам расчётов с моделями ЧПП ICON и GFS – занижена. В российской части бассейна по спутниковым данным и по реанализу фиксируется

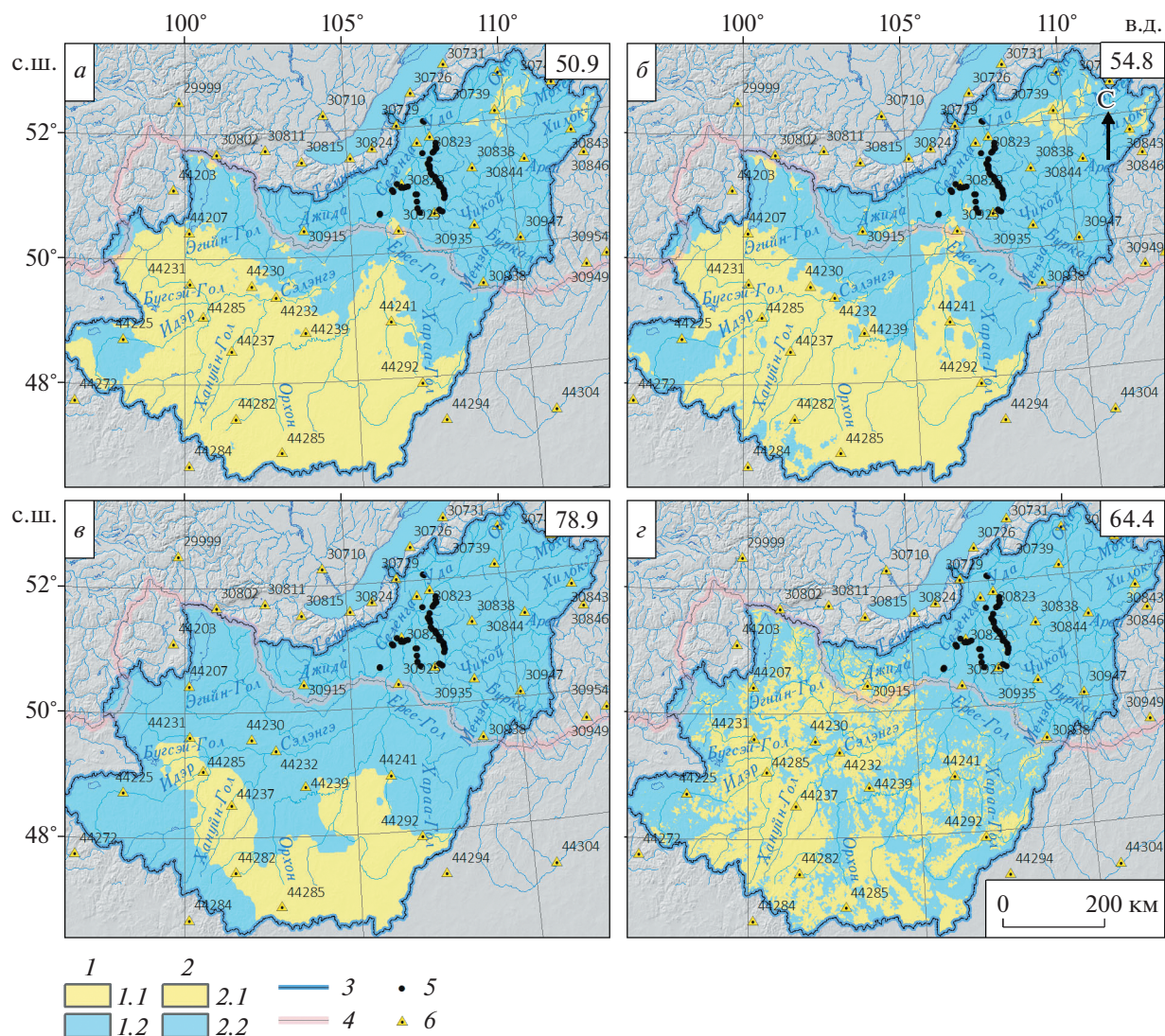


Рис. 4. Сопоставление расчётной и фактической площади снегового покрытия в бассейне р. Селенги на 23.02.2022: (а) расчёт по данным модели ICON; (б) расчёт по данным модели GFS/NCEP; (в) данные ERA5-Land; (г) данные Terra MODIS: 1 – расчётная площадь снегового покрытия (1.1 – отсутствие снежного покрова, 1.2 – снежный покров); 2 – площадь снегового покрытия по спутниковым данным (2.1 – отсутствие снежного покрова, 2.2 – снежный покров); 3 – границы бассейна; 4 – границы Российской Федерации; 5 – точки, в которых проводились снегомерные съёмки; 6 – метеостанции. В левом верхнем углу указана доля площадь снегового покрытия в бассейне (%).

Fig. 4. Comparison of the calculated and satellite-derived snow-covered area (SCA) in the Selenga river basin for 02.23.2022: calculation according to the ICON model (а); calculation according to the GFS/NCEP model (б); ERA5-Land data (в); Terra MODIS data (г): 1 – calculated SCA (1.1 – snowless surface, 1.2 – snow cover); 2 – SCA according to satellite data (2.1 – snowless surface, 2.2 – snow cover); 3 – basin boundaries, 4 – RF borders; 5 – snow survey locations; 6 – weather stations. The proportion of SCA in the basin is indicated in the upper left corner (%).

сплошной снежный покров, а по результатам расчётов с моделями GFS/NCEP и ICON имеются отдельные бесснежные участки, в частности в долине р. Селенги, что также вносит вклад в общую недооценку площади, покрытой снегом (см. рис. 4). В 2021 г. площадь снегового покрытия, рассчитанная по безоблачному спутниковому снимку и по данным модели ICON за 6 марта, оказалась очень близка (54.0 и 49.7% от площади бассейна соответственно). При этом расчёт на ос-

нове данных метеостанций даёт её существенное занижение (34.8% от площади бассейна).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом использование данных глобальных моделей ЧПП ICON и GFS/NCEP и эмпирической методики расчёта снегонакопления позволило получить правдоподобные оценки пространственного распределения SWE в бассейне р. Селенги в холодные сезоны 2020–2022 гг.,

несмотря на то, что данная методика была изначально разработана применительно к бассейну р. Камы, которая отличается совершенно иными климатическими условиями. Валидация результатов по данным снегомерных съёмок была выполнена только по российской части бассейна, что является некоторым ограничением. В 2021 г. на разных маршрутах имело место как завышение, так и занижение расчётного SWE в сравнении с данными снегосъёмок (относительная ошибка в пределах 20–50% от измеренного SWE). При этом в степной зоне преобладало занижение, а в горах — завышение SWE. Точность расчёта SWE на основе данных модели ICON оказалась выше, чем по данным метеостанций, несмотря на то, что модель завышала количество осадков в среднем по бассейну. В 2022 г. точность результатов оказалась в целом ниже. При расчёте по данным модели ICON отмечено существенное занижение SWE в сравнении с данными снегосъёмок, но по данным модели GFS/NCEP результаты оказались удовлетворительными.

Сопоставление результатов с данными реанализа ERA5—Land и спутниковыми снимками MODIS позволило установить, что реанализ существенно завышает как SWE, так и площадь снегового покрытия. По результатам расчётов на основе данных моделей GFS/NCEP и ICON площадь снегового покрытия оказалась занижена, что коррелирует с выявленным занижением SWE.

Полученные результаты имеют предварительный характер, поскольку содержат существенные неопределенности: первым — эмпирические коэффициенты, используемые при расчёте интенсивности снеготаяния при оттепелях и интенсивности сублимации со снежного покрова. Вклад неопределенностей, связанных с оценкой перехвата осадков растительностью, оценить сложнее, так как большинство снегомерных маршрутов пролегали на открытой местности. Неточности при расчете расходной составляющей баланса снегозапасов также могут быть связаны с вычислением пространственного распределения температуры воздуха с учетом вертикального градиента (например, при развитии над регионом мощных температурных инверсий); вторым — численные прогнозы осадков (наблюдается тенденция к завышению количества осадков, особенно в начале и в конце периода снегонакопления). Важно отметить, что существенное завышение количества осадков по моделям ЧПП было выявлено при сравнении со средними значениями по метеостанциям в пределах бассейна, тогда как в районе проведения снегомерных съёмок (по ближайшим метеостанциям) величина завышения была меньше.

Полученные результаты расчётов снегонакопления были опубликованы на картографическом веб-сервисе “ГИС гидроэкологической безопас-

ности бассейна р. Селенги” (<http://selen-ga.psu.ru/>). В перспективе на данном сервисе планируется опубликование других расчётных характеристик снежного покрова в бассейне.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 20-17-00207. Расчёты характеристик снежного покрова по данным моделей ICON и GFS также выполнены за счёт средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (“ПРИОРИТЕТ-2030”).

Acknowledgments. The study was funded by Russian Scientific Foundation grant no. 20-17-00207. Calculations of snowpack characteristics according to the ICON and GFS NWP models were also supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (“PRIORITY-2030”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Изд-во “Академия”, 2010. 304 с.
- Гаврилова С.Ю. Устранение неоднородности временных рядов атмосферных осадков и их использование для анализа изменений режима увлажнения на территории России. Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. СПб.: Главная геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова, 2010. 111 с.
- Гармаев Е.Ж., Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. Новосибирск: ГЕО, 2010, 227 с.
- Гордеев И.Н. Методика расчета интенсивности снеготаяния в прогнозах весеннего стока сибирских рек. Научно-практическая школа—семинар молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии. Новосибирск, 2012. // Электронный ресурс. <http://sibnigmi.ru/documents/school/Gordeev.pdf>. Дата обращения: 18.10.2022.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
- Казакова Е.В. Ежедневная оценка локальных значений и объективный анализ характеристик снежного покрова в рамках системы численного прогноза погоды COSMO-Ru. Дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук М.: Гидрометцентр России, 2015. 181 с.
- Карпечко Ю.В., Бондарик Н.Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 225 с.
- Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 199 с.
- Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961, 346 с.
- Миллионщикова Т.Д. Моделирование и предвычисление многолетних изменений стока р. Селенги. Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Ин-т водных проблем РАН, 2019. 133 с.

- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Ин-т водных проблем РАН, 2018. 296 с.
- Пьянков С.В., Шихов А.Н., Михайлюкова П.Г. Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 4. С. 494–508.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-423>
- Сандакова С.Л., Дангасурен Б. Влияние стихийных природных бедствий на состояние популяций овец Восточной Монголии // Вест. Бурятского гос. ун-та. 2014. Т. 11. № 4. С. 80–82.
- Турков Д.В., Сократов В.С. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 369–380.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-369-380>
- Чурюлин Е.В. Использование спутниковой и модельной информации о снежном покрове при расчетах характеристик весеннего половодья Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2019. 175 с.
- Чурюлин Е.В., Копейкин В.Н., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорол. исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 120–143.
- Arino O., Bicheron P., Achard F., Latham J., Witt R., Weber J.-L. GLOBCOVER: the most detailed portrait of EarthIn. // European Space Agency Bulletin. 2008. № 136. P. 24–31.
- Bellaire S., Jamieson J.B., Fierz C. Forcing the snow-cover model SNOWPACK with forecasted weather data // The Cryosphere. 2011. V. 5. P. 1115–1125.
<https://doi.org/10.5194/tc-5-1115-2011>
- Bigio E.R., Swetnam T.W., Baisan C.H., Guiterman C.Y., Kisilyakhov V.K., Andreev S.G., Batotsyrenov E.A., Ayurzhanaev A.A. The influence of land-use activities and regional drought on historical fire regimes of Buryatia, Siberia // Environmental Research Letters. 2022. V. 17 (5). № 054043.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6964>
- Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigoriev V.Y., Sazonov A.A. Runoff fluctuations in the Selenga River Basin // Regional Environmental Change. 2017. V. 17 (7). P. 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s10113-017-1199-0>
- Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Environment, 1995. V. 54. P. 127–140.
- Kazakova E.V., Chumakov M.M., Rozinkina I.A. The system for computing snow cover parameters for forming initial fields for numerical weather prediction based on the COSMO-Ru model // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40 (5). P. 296–304.
<https://doi.org/10.3103/S1068373915050027>
- Kuchment L.S., Gelfan A.N., Demidov V.N. A distributed model of runoff generation in the permafrost regions // Journ. of Hydrology. 2000. V. 240. P. 1–22.
- Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N., Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation // Hydrology and Earth system science. 2010. V. 14 (2). P. 339–350.
<https://doi.org/10.5194/hess-14-339-2010>
- Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Shvetsov E.G., Conard S.G., Kalenskaya O.P. The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia // Forest Ecology and Management. 2016. V. 82. P. 225–235.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015>
- Motovilov Yu., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Department of Geophysics, University of Oslo. 1999. 88 p.
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth System Science Data, 2021. V. 13 (9). P. 4349–4383.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R., Lott A., Friedl M. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data // Remote Sensing of Environment, 2002. V. 83. P. 214–231.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00074-3)
- Quéno L., Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M., Karbou F. Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometric-resolution meteorological forecasts // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 1571–1589.
<https://doi.org/10.5194/tc-10-1571-2016>
- Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin // Journ. of Geogr. Sciences, 2018. V. 28 (2). P. 221–237.
<https://doi.org/10.1007/s11442-018-1469-x>
- Romasko V.Y., Burakov D.A. Space Monitoring of Snow Cover of River Watersheds // Journ. of Siberian Federal University. Engineering and Technologies, 2017. V. 10 (6). P. 704–713.
<https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713>
- Shikhov A.N., Churiulin E.V., Abdullin R.K. Assessment of the accuracy of snow water equivalent calculation with the use of global numerical weather prediction models and SnoWE snowpack model (by the example of the Kama River basin) // Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences. 2021. V. 66 (1).
<https://doi.org/10.21638/SPBU07.2021.110>
- Wilson J.P., Gallant J.C. Terrain Analysis – Principles and Applications. New York, John Wiley & Sons. 2000. 520 p.
- WGNE Overview of Plans at NWP Centres with Global Forecasting Systems – 2022. // Электронный ресурс. <http://wgne.meteoinfo.ru/nwp-systems-wgne-table/wgne-table/> (Дата обращения 21.01.2023).

Citation: Shikhov A.N., Chernykh V.N., Aurzhanaev A.A., Pyankov S.V., Abdullin R.K. Estimation of snow water equivalent in semiarid zone from data of global numerical models ICON and GFS/NCEP (case study of the Selenga River basin). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (2): 257–270. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423020151

Estimation of Snow Water Equivalent in Semiarid Zone from Data of Global Numerical Models ICON and GFS/NCEP (Case Study of the Selenga River Basin)

A. N. Shikhov^{a,b,#}, V. N. Chernykh^c, A. A. Aurzhanaev^b, S. V. Pyankov^a, and R. K. Abdullin^a

^a Perm State University, Perm, Russia

^b Kazan Federal University, Kazan, Russia

^c Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the RAS, Ulan-Ude, Russia

[#]e-mail: and3131@inbox.ru

The possibility to use the global numerical (NWP) models ICON and GFS/NCEP for We consider the applicability of ICON and GFS/NCEP global numerical atmospheric model data for calculating the snow water equivalent (SWE) in the Selenga River basin located the semiarid zone. SWE was calculated for the cold periods of 2020–2022 based on the empirical methodology previously developed for the Kama River basin and adapted to the semiarid conditions. The main components of the SWE balance that are taken into account in the calculation are atmospheric precipitation (liquid or solid phase), snowmelt, sublimation from the snow surface and precipitation interception by vegetation with subsequent sublimation. The validation of the results was performed for the Russian part of the basin using the data of snow surveys carried out in the second half of the winter of 2021/22. In general, reasonable estimates of the SWE spatial distribution were obtained. While in 2021, both overestimation and underestimation by 1–15 mm (20–50%) of the calculated SWE was observed at different sites compared to the measurements, in 2022, its systematic underestimation was observed, especially significant in calculations using the ICON model data. In the steppe zone, SWE is significantly underestimated, which may be due to overestimation of the intensity of sublimation from the snow surface. The comparison of these results with the ERA5-Land reanalysis data and MODIS satellite images showed that the ERA5-Land reanalysis significantly overestimates the SWE and the snow cover area. The simulation results based on the GFS/NCEP and ICON models underestimated the snow cover area in 2022 and reproduced well in 2021, which correlates with the results of the SWE calculation.

Keywords: Selenga river basin, snow water equivalent, snow accumulation, sublimation and melting, global numerical weather prediction models ICON, GFS/NCEP, field snow survey

REFERENCES

- Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Matematicheskoye modelirovaniye v gidrologii*. Mathematical modeling in hydrology. Moscow: Academy Center, 2010: 304 p. [In Russian].
- Gavrilova S.Yu. *Ustraneniye neodnorodnosti vremennykh ryadov atmosferykh osadkov i ikh ispol'zovanie dlya analiza izmeneniy rezhima uvlazhneniya na territorii Rossii*. Elimination of the non-stationarity of precipitations time series and their use for the analysis of changes in the moisture regime in Russia: Abstract of the PhD-thesis. Saint Petersburg: Voeikov Main Geophysical Observatory 2010: 111 p. [In Russian].
- Garmaev E.Zh., Khristoforov A.V. *Vodnyye resursy rek basseyna ozera Baykal: osnovy ikh ispol'zovaniya i okhrany*. Water resources of the rivers of the Baikal basin: the fundamentals of their use and protection. Novosibirsk: GEO, 2010: 227 p. [In Russian].
- Gordeev I.N. The method of snowmelt intensity calculation for the forecasts of spring runoff of Siberian rivers. Scientific-practical school-seminar for young scientists and specialists in the field of hydrometeorology. Novosibirsk, 2012. Retrieved from: <http://sibnigmi.ru/documents/school/Gordeev.pdf>. (Last access: 18.10.2022) [In Russian].
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovaniye teplo- i vlagoobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy*. Modeling of heat and moisture exchange of the land surface with the atmosphere. Moscow: Nauka, 2010: 327 p. [In Russian].
- Kazakova E.V. *Yezhednevnyaya otsenka lokal'nykh znacheniy i ob'yektivnyy analiz kharakteristik snezhnogo pokrova v ramkakh sistemy chislennogo prognoza pogody COSMO-Ru*. Daily assessment of local values and objective analysis of snow cover characteristics in the framework of the COSMO-Ru numerical weather forecast system. PhD. Moscow: Hydrometeorological center of Russia, 2015: 181 p. [In Russian].
- Karpechko Yu.V., Bondarik N.L. *Gidrologicheskaya rol' lesokhozyaistvennykh i lesopromyshlennykh rabot v taezhnoy zone Evropeiskogo Severa Rossii*. Hydrological role of forestry and logging in the taiga zone of the Russian European North. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, 2010: 225 p. [In Russian].
- Koren' V.I. *Matematicheskiye modeli v prognozhakh rechnogo stoka*. Mathematical models in river runoff forecasts. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991: 199 p. [In Russian].
- Kuzmin P.P. *Process tayaniya snezhnogo pokrova*. The process of melting snow cover. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1961: 346 p. [In Russian].

- Millionshechikova T.D. *Modelirovaniye i predvychisleniye mnogoletnikh izmeneniy stoka r. Selengi*. Modeling and prediction of long-term changes in the runoff of the Selenga River. PhD. Moscow: Water problem Institute of RAS, 2019: 133 p. [In Russian].
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseynov*. Models of runoff formation for the challenges of river basins hydrology. Moscow: Water problem Institute of RAS, 2018: 296 p. [In Russian].
- Pyankov S.V., Shikhov A.N., Mikhaylyukova P.G. Simulation of snow accumulation and melting in the Kama river basin using data from global prognostic models. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 59 (4): 494–508 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-423>
- Sandakova S.L., Dangasuren B. Influence of natural disasters on the state of sheep populations in Eastern Mongolia. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta*. Bulletin of the Buryat State University. 2014, 11 (4): 80–82 [In Russian].
- Turkov D.V., Sokratov V.S. Calculation of snow cover characteristics on lowland areas with the use of the SPONSOR model of local heat and moisture exchange and reanalysis data on the example of the Moscow region. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 369–380 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-369-380>
- Churyulin E.V. *Ispol'zovaniye sputnikovoy i model'noy informatsii o snezhnom pokrove pri raschetakh kharakteristik vesennego polovod'ya*. Using satellite-based and simulated snow cover information for calculating spring flood characteristics. PhD. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2019: 175 p. [In Russian].
- Churyulin E.V., Kopeikin V.N., Rozinkina I.A., Frolova N.L., Churyulina A.G. Analysis of snow cover characteristics using satellite and model data for various basins on the European territory of Russian Federation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. Hydro-meteorological studies and forecasts. 2018, 2 (368): 120–143 [In Russian].
- Arino O., Blicheron P., Achard F., Latham J., Witt R., Weber J.-L. GLOBCOVER: the most detailed portrait of EarthIn. European Space Agency Bulletin. 2008, 136: 24–31.
- Bellaire S., Jamieson J.B., Fierz C. Forcing the snow-cover model SNOWPACK with forecasted weather data. *The Cryosphere*. 2011, 5: 1115–1125. <https://doi.org/10.5194/tc-5-1115-2011>
- Bigio E.R., Swetnam T.W., Baisan C.H., Guiterman C.Y., Kisilyakhov V.K., Andreev S.G., Batotsyrenov E.A., Ayurzhanaev A.A. The influence of land-use activities and regional drought on historical fire regimes of Buryatia, Siberia. *Environmental Research Letters*. 2022, 17 (5): 054043. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6964>
- Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigoriev V.Y., Sazonov A.A. Runoff fluctuations in the Selenga River Basin. *Regional Environmental Change*. 2017, 17 (7): 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1199-0>
- Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*. 1995, 54: 127–140.
- Kazakova E.V., Chumakov M.M., Rozinkina I.A. The system for computing snow cover parameters for forming initial fields for numerical weather prediction based on the COSMO-Ru model, Russian Meteorology and Hydrology. 2015, 40 (5): 296–304. <https://doi.org/10.3103/S1068373915050027>
- Kuchment L.S., Gelfan A.N., Demidov V.N. A distributed model of runoff generation in the permafrost regions. *Journ. of Hydrology*. 2000, 240: 1–22.
- Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N., Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation. *Hydrology and Earth System Science*. 2010, 14 (2): 339–350. <https://doi.org/10.5194/hess-14-339-2010>
- Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Shvetsov E.G., Conard S.G., and Kalenskaya O.P. The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia. *Forest Ecology and Management*. 2016, 82: 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015>
- Motovilov Yu., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, 1999: 88.
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 2021, 13 (9): 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R., Lott A., Friedl M. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. 2002, 83: 214–231. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00074-3)
- Quéno L., Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M., Karbou F. Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometer-resolution meteorological forecasts. *The Cryosphere*. 2016, 10: 1571–1589. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1571-2016>
- Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin. *Journ. of Geographical Sciences*. 2018, 28 (2): 221–237. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1469-x>
- Romasko V.Y., Burakov D.A. Space Monitoring of Snow Cover of River Watersheds. *Journ. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2017, 10 (6): 704–713. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713>
- Shikhov A.N., Churyulin E.V., Abdullin R.K. Assessment of the accuracy of snow water equivalent calculation with the use of global numerical weather prediction models and SnoWE snowpack model (by the example of the Kama River basin). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2021, 66 (1). <https://doi.org/10.21638/SPBU07.2021.110>
- Wilson J.P., Gallant J.C. *Terrain Analysis – Principles and Applications*. New York, John Wiley & Sons. 2000: 520.
- WGNE Overview of Plans at NWP Centres with Global Forecasting Systems – 2022. Retrieved from: <http://wgne.meteoinfo.ru/nwp-systems-wgne-table/wgne-table/> (Last access: 21.01.2023).