

Оценка достоверности расчета запасов воды в снежном покрове с применением данных глобальных моделей прогноза погоды и модели снежного покрова SnoWE (на примере бассейна р. Камы)*

А. Н. Шихов¹, Е. В. Чурюлин^{2,3}, Р. К. Абдуллин¹

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

² Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Российская Федерация, 123242, Москва, Бол. Предтеченский пер., 11–13

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

Для цитирования: Шихов, А. Н., Чурюлин, Е. В., Абдуллин, Р. К. (2021). Оценка достоверности расчета запасов воды в снежном покрове с применением данных глобальных моделей прогноза погоды и модели снежного покрова SnoWE (на примере бассейна р. Камы). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (1), 167–188. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.110>

Рассмотрены результаты моделирования формирования и таяния снежного покрова в бассейне р. Камы ($S = 507$ тыс. км²) с применением двух подходов, ранее независимо разработанных авторами. Первым из них является модель снежного покрова SnoWE, разработанная в Гидрометцентре РФ, вторым — эмпирическая методика, реализуемая средствами ГИС-технологий для бассейна р. Камы. Оба метода основаны на комбинировании данных моделей численного прогноза погоды с оперативными синоптическими наблюдениями на метеостанциях. Исследование было выполнено для зимних сезонов 2018/2019 и 2019/2020 гг. Оценка достоверности полученных результатов выполнена по данным с 68 снегомерных маршрутов, распределенных по всей площади бассейна р. Камы. В результате исследования выявлены основные преимущества и ограничения использованных методов расчета запаса воды в снежном покрове (snow water equivalent — SWE). Среднеквадратичная ошибка расчета SWE составляет 14–28 % от среднего фактического значения (полученного по данным снегосьеомок). При этом в зимний сезон 2019/2020 гг. точность расчетов оказалась значительно ниже, чем в 2018/2019 гг., по причине частых оттепелей. Модель SnoWE более достоверно воспроизводит SWE на большей части бассейна р. Камы, за исключением северных районов и Уральских гор, где SWE существенно занижается. Второй метод дает более реалистичную оценку распределения SWE по площади бассейна, а также корректно работает для горной местности. В то же время при использовании данного метода резко снижается точность расчетов SWE в весенний период.

Ключевые слова: снежный покров, запас воды в снежном покрове, SWE, модели численного прогноза погоды, модель снежного покрова SnoWE, ГИС-технологии, бассейн р. Камы.

* Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ № МК-313.2020.5 и гранта РФФИ (№ 17-05-01001-а).

1. Введение и постановка проблемы

Сезонный снежный покров является одним из ключевых компонентов гидрологического цикла, оказывающих влияние на формирование речного стока во многих регионах Земли. Оценка пространственного распределения характеристик снежного покрова имеет важнейшее значение при прогнозировании речного стока, а также для управления водными ресурсами, развития гидроэнергетики и сельского хозяйства. Можно выделить четыре основных характеристики снежного покрова, которые являются объектом наземного или дистанционного мониторинга — площадь снегового покрытия и граница снежного покрова, высота снежного покрова, высота свежевыпавшего снега и запас воды в снеге. Перечисленные характеристики могут быть измерены на сети метеорологических станций и на снегомерных маршрутах, а также оцениваются по данным дистанционного зондирования Земли, на основе моделей снежного покрова или моделей численного прогноза погоды.

Запас воды в снеге (snow water equivalent — SWE) является одной из основных характеристик снежного покрова, особенно важной для составления гидрологических прогнозов. Основным способом измерения SWE на территории России являются маршрутные снегомерные съемки, которые проводятся на регулярной основе в полевой и лесной местности. В настоящее время на территории России функционирует 830 снегомерных маршрутов, из них 63 % — полевые маршруты, 37 % — лесные маршруты. Методика проведения снегомерных съемок в России описана в (Наставление..., 1985).

Данные снегомерных съемок имеют ряд ограничений: низкую частоту проведения измерений (один раз в пять или десять дней); пространственную неравномерность; отсутствие данных в труднодоступных и горных районах; ограниченную точность пространственной интерполяции данных (Турков и Сократов, 2016; Чурюлин и др., 2018). Получение достоверной информации о SWE с высоким пространственным и временным разрешением по-прежнему остается актуальной проблемой, особенно для районов со сложной орографией и редкой сетью наблюдений.

В последние десятилетия важнейшим методом оценки пространственного распределения характеристик снежного покрова является математическое моделирование. В настоящее время модели снежного покрова различной сложности успешно применяются для решения ряда задач:

- для прогнозирования талого стока в качестве блоков в соответствующих гидрологических моделях включены однослойные физически обоснованные модели снежного покрова, как, например, в модели формирования стока ECOMAG (Motovilov et al., 1999; Мотовилов и Гельфан, 2018), или упрощенные схемы, как в модели «Гидрограф» (Виноградов и Виноградова, 2010);
- для прогнозирования лавиноопасности в горах, как правило, требуются более сложные модели снежного покрова (см., напр., Bellaire et al., 2011; 2017);
- в моделях численного прогноза погоды (ЧПП) схемы параметризации снежного покрова включаются в блоки описания подстилающей поверхности (Казакова, 2015; Турков и Сократов, 2016; Чурюлин, 2019).

Источниками начальных данных об атмосферных осадках в моделях снежного покрова традиционно были измерения на метеостанциях (см., напр., Kuchment et al., 2000; 2010)). Однако на значительной части территории России (прежде

всего в районах с пересеченным рельефом) плотность сети метеостанций недостаточна для описания пространственного распределения осадков с необходимой детальностью. В связи с этим в последние годы все более актуальным становится использование выходных данных моделей ЧПП в качестве входной информации (метеорологического форсинга) в моделях снежного покрова. Этому способствует непрерывный рост пространственного разрешения моделей ЧПП (wgne.meteoinfo.ru, n. d.). Пространственное распределение атмосферных осадков в течение холодного периода воспроизводится моделями ЧПП достаточно реалистично для того, чтобы использовать эти данные при расчетах снегонакопления (Kalinin et al., 2015). В частности, модели ЧПП позволяют воспроизвести распределение атмосферных осадков в условиях сложного рельефа более корректно, чем интерполяция фактических данных наблюдений, поскольку в них учитывается направление воздушных потоков (Quéno et al., 2016).

Подход, основанный на комбинировании моделей ЧПП с моделями формирования стока или снежного покрова, получил название «комплексное гидрометеорологическое моделирование» (в англоязычной литературе — *coupled hydro-meteorological modeling*) (Verbunt et al., 2006). Успешная реализация данного подхода для моделирования снегонакопления и снеготаяния в горных районах описана во множестве работ (см., напр., (Bellaire et al., 2011; Quéno et al., 2016; Vionnet et al., 2016)). В России, несмотря на очевидную перспективность использования данных моделей ЧПП для расчета характеристик снежного покрова, таких исследований проведено пока сравнительно немного.

В Гидрометцентре России в рамках системы ЧПП COSMO-Ru разрабатывается технология расчета снегонакопления и снеготаяния по всей территории России, получившая название SnoWE (Казакова, 2015; Kazakova et al., 2015; Чурюлин и др., 2018). Данная технология основана на совмещении выходных данных системы ЧПП COSMO-Ru и оперативных синоптических наблюдений на метеостанциях. С 2015 г. технология используется в квазиоперативном режиме для расчета характеристик снежного покрова по всей территории России (COSMO-Ru, ENA), на европейской территории России (COSMO-Ru, ETR) и в Центральном федеральном округе (COSMO-Ru, CFO) с шагом сетки 13, 7 и 2.2 км соответственно. В работе (Чурюлин и др., 2018) представлена оценка достоверности расчета SWE на основе технологии SnoWE для некоторых речных бассейнов на территории России. Было установлено, что наиболее высокая точность расчетов по модели SnoWE отмечается для бассейнов центральной (бассейн р. Оки) и северной (бассейн р. Северной Двины) частей европейской территории России. Здесь среднеквадратичная ошибка (RMSE), полученная при сравнении рассчитанных и фактических значений SWE, составляла соответственно 17 и 28 мм. Тем не менее валидация результатов расчетов по модели SnoWE остается актуальной задачей, особенно для районов с пересеченным рельефом, так как все бассейны, рассмотренные в работе (Чурюлин и др., 2018), были равнинными.

Альтернативная эмпирическая методика расчета SWE на основе краткосрочных прогнозов осадков по мезомасштабной модели атмосферы WRF (с шагом сетки 10 км) была реализована для территории бассейна Воткинского водохранилища, расположенного в верхней части водосбора р. Камы (Kalinin et al., 2015; Ryankov et al., 2018). Величина относительной ошибки расчета SWE в период максималь-

ного снегонакопления составила около 25 % в сравнении с данными маршрутных снегомерных наблюдений. С 2018 г. производится расчет SWE для всего бассейна р. Камы по аналогичной методике, на основе общедоступных данных глобальных моделей ЧПП GFS (США), GEM (Канада) и SL-AV (Россия) совместно с данными метеостанций. Следует отметить, что выходные данные глобальных моделей ЧПП имеют более низкое пространственное разрешение (13–25 км), чем данные модели WRF (10 км), но при этом ошибка расчета SWE осталась примерно на том же уровне, что и при использовании модели WRF.

В холодный период 2018/2019 и 2019/2020 гг. при расчетах снегонакопления для бассейна р. Камы использовались данные двух моделей: ICON (Германия) и GFS (США). Стоит отметить, что в 2019 г. модель ICON обеспечивала более высокую точность краткосрочного прогноза атмосферных осадков в холодный период в сравнении с моделями GEM, GFS и WRF (Pyankov et al., 2019).

В ходе проведенных в 2018/2019 и 2019/2020 гг. численных экспериментов были получены результаты расчетов характеристик снежного покрова (высоты, плотности, запаса воды в снеге) для бассейна р. Камы с применением различных начальных данных (моделей ICON, GFS, COSMO-Ru и данных метеостанций) и методов расчета. Результаты моделирования имеют одинаковое временное разрешение (1 сут) и сопоставимый шаг сетки (3 и 7 км).

Основной целью настоящего исследования является оценка применимости двух вышеописанных подходов для проведения расчетов SWE в бассейне р. Камы, а также их сопоставление с данными маршрутных снегомерных съемок на материалах для двух зимних сезонов (2018/2019 и 2019/2020 гг.), которые принципиально различались по метеорологическим условиям снегонакопления.

Рассматриваемый в работе бассейн р. Камы имеет площадь 507 тыс. км². Большая часть его территории относится к Восточно-Европейской равнине, восточная часть относится к горным областям Северного, Среднего и Южного Урала с абсолютной высотой до 1638 м. Средняя лесистость бассейна составляет около 55 % и изменяется от 10 % и менее на юге и юго-западе до 90 % и более на северо-востоке.

2. Данные и методы

Основные сведения о примененных методах моделирования формирования и таяния снежного покрова, входных и выходных данных приведены в табл. 1. В табл. 2 содержится краткая характеристика моделей ЧПП, прогностические поля которых использовались в качестве начальных данных при расчетах снегозапасов.

Для валидации результатов моделирования использовались данные независимых полевых и лесных маршрутных снегомерных наблюдений, выполняемых на одноименных метеостанциях Росгидромета. За зимний период 2018/2019 гг. были получены данные с 40 полевых и 23 лесных снегомерных маршрутов, а за 2019/2020 гг. — с 45 полевых и 28 лесных маршрутов. Частота проведения снегомерных съемок в зимний период составляла в основном 10 сут, в марте-апреле — 5 сут.

Также для оценки достоверности расчета сумм осадков по моделям ЧПП брались данные об осадках с метеостанций. Всего на водосборе р. Камы расположено 75 метеостанций, данные которых публикуются в открытом доступе. Однако только 66 из них могли быть использованы для оценки достоверности расчетов сумм

Таблица 1. Краткие сведения об использованных методах моделирования снежного покрова

Модель снежного покрова	Модель ЧПП (начальные данные)	Прочие начальные данные, необходимые для запуска модели	Выходная продукция модели снежного покрова	Размер ячейки модели и временное разрешение	Формат выходных данных
SnoWE (Казакова, 2015; Чурюлин, 2019)	COSMO-Ru	Данные метеостанций (высота снежного покрова, температура воздуха, осадки, скорость ветра) Спутниковые данные NOAA (граница снежного покрова)	SWE, высота снежного покрова, плотность снега	7 км / 24 ч	GRIB (сеточные данные) txt (характеристики снежного покрова на метеостанциях)
Эмпирическая методика (Pyankov et al., 2019)	ICON	данные метеостанций (температура и влажность воздуха, осадки)	SWE, водоотдача снега, площадь снегового покрытия	3 км / 24 ч	Geotiff
	GFS				

Таблица 2. Основные характеристики моделей ЧПП, прогнозы которых использованы как начальные данные для моделирования снежного покрова (wgne.meteoinfo.ru, n. d.)

Модель ЧПП	Разработчик модели	Шаг сетки, км	Число вертикальных уровней	Шаг сетки выходных данных	Ссылка на получение данных
GFS	Национальный центр по прогнозированию окружающей среды (NCEP), США	13	64	0.25°	http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/
ICON	Метеослужба Германии (DWD)	13	90	0.125°	http://ftp-outgoing2.dwd.de/gds/ICON/grib/europe/
COSMO-Ru	Специальная конфигурация модели COSMO (DWD) для территории России, за развитие которой отвечает Гидрометцентр РФ	7	50	7 км	https://sites.google.com/view/lab-cosmo-ru/

осадков по моделям. Остальные 9 метеостанций были исключены вследствие наличия пропусков или возможного систематического занижения количества осадков по причине ветрового недоучета. Предположение о ветровом недоучете основано на сопоставлении сумм осадков с ближайшими станциями за несколько последних лет. Также все эти станции находятся на открытой местности, что способствует выдуванию твердых осадков.

Основной особенностью модели SnoWE в сравнении с другими моделями снежного покрова является технология ежедневной коррекции расчетных характеристик снежного покрова на основе данных метеостанций. Это позволяет устранить проблему накопления ошибок в модели и существенно повысить достоверность расчетов SWE. В то же время модель SnoWE имеет ряд ограничений в сравнении с большинством других моделей снежного покрова.

- Модель SnoWE позволяет рассчитывать характеристики снежного покрова с суточной дискретностью по времени, уменьшить шаг по времени с использованием только данных фактических синоптических наблюдений не представляется возможным.
- Модель SnoWE не учитывает в явном виде изменчивость SWE, обусловленную рельефом, и в целом не предназначена для расчета характеристик снежного покрова в горной местности. Модель позволяет рассчитать характеристики снежного покрова в конкретной точке, но при этом интерполяция полученных значений может быть некорректной. В горной местности модель использует данные полей первого приближения из систем ЧПП.
- Из-за использования в качестве начальных данных сведений о фактической высоте снежного покрова существует зависимость точности расчетов модели SnoWE от фактических данных о высоте снега.
- В текущей версии модели SnoWE не учитывается в явном виде влияние лесной растительности на процесс формирования и таяния снежного покрова, в частности замедление процесса снеготаяния в лесу в сравнении с открытой местностью, а также перехват осадков древесной растительностью с последующим испарением. В данном направлении ведутся работы, внедрение которых требует дополнительного тестирования технологии.

2.2. Эмпирическая методика расчета влагозапасов снега на основе выходных данных численных моделей атмосферы ICON и GFS

Методика, используемая для расчетов SWE в бассейне р. Камы на основе комбинирования выходных данных моделей ЧПП и данных метеостанций, подробно описана в работе (Рянков et al., 2019), вопросы подготовки данных для расчетов более детально рассматриваются в статьях (Kalinin et al., 2015; Рянков et al., 2018). Графическая схема методики приведена на рис. 2.

Вычисления производятся в геоинформационной системе ArcGIS 10.* с помощью последовательного запуска ряда скриптов и моделей геообработки, в основном использующих средства растровой алгебры. Реализованы модели геообработки для расчета пространственного распределения температуры, влажности воздуха, количества осадков с учетом их фазы, скорости ветра и, собственно, характеристик снежного покрова на основе комбинирования данных моделей ЧПП и оперативных наблюдений метеостанций. Результаты расчетов публикуются на картографическом веб-сервисе (<http://hydromonitor.maps.psu.ru/>).

Основными составляющими баланса снеготаяния, которые учитываются в данной схеме, являются атмосферные осадки (с учетом их фазы), снеготаяние, сублимация с поверхности снега и перехват осадков растительностью с последу-



Рис. 2. Общая схема эмпирической методики расчета запасов воды в снеге

ющим испарением. Для расчета сумм осадков были получены прогнозы их суточного количества по глобальным моделям атмосферы ICON и GFS с заблаговременностью 3 и 27 ч от прогноза на 12 ч. Всемирного скоординированного времени (BCV), что позволило обеспечить совпадение со сроками измерения количества атмосферных осадков на метеостанциях.

Расчет пространственного распределения температуры и влажности воздуха производился на основе интерполяции данных с метеостанций, поскольку модели ЧПП существенно занижают температуру воздуха в период весеннего снеготаяния (Kalinin et al., 2015; Churiulin et al., 2019). При интерполяции учитывался вертикальный градиент температуры и влажности воздуха в нижнем (1.5 км) слое атмосферы. Более подробно методика интерполяции рассмотрена в работе (Pyankov et al., 2018).

Расчет потерь снежного покрова на снеготаяние и испарение осуществлялся с использованием простых соотношений, принятых в практике оперативных расчетов и адаптированных для физико-географических условий бассейна р. Камы. Интенсивность снеготаяния рассчитывается по величине среднесуточной температуры воздуха и приходящей солнечной радиации без учета облачности (Pyankov et al., 2019), а сублимация снега — по упрощенной схеме П. П. Кузьмина (Кузьмин, 1961). Также учитывается перехват атмосферных осадков древесной растительностью на основе схемы, описанной в работе (Pyankov et al., 2019). Для определения параметров модели используются данные о подстилающей поверхности (ПП) на водосборе р. Камы.

— *Цифровая модель рельефа водосбора* с шагом сетки 3 км, которая применяется для коррекции исходных (полученных по модели ЧПП) данных об атмосферных осадках. Коррекция основывается на предположении

о постоянном увеличении выпадения количества атмосферных осадков с высотой местности на 10 % на каждые 100 м. Эта величина была определена по результатам анализа климатических данных ранее существовавшей густой осадкомерной сети (Справочники..., 1965–1974).

- *Карта типов ПП* в бассейне р. Камы с пространственным разрешением 350 м, описанная в работе (Pyankov et al., 2019). Карта создана на основе данных с карты лесов России (Bartalev et al., 2004) и GlobCover-2009 (Arino et al., 2008). Легенда карты включает 15 различных типов ПП, в том числе 7 типов леса. Данные использовались для определения температурных коэффициентов стаивания и коэффициентов ослабления скорости ветра в зависимости от типа ПП.
- *Значения листового индекса LAI*, полученные на основе продукта обработки спутниковых данных MODIS – MOD15A2 (8-day LAI and FPAR), с веб-сервиса NASA (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>). Эти данные использовались для расчета перехвата твердых атмосферных осадков лесной растительностью.

Таким образом, в отличие от модели SnoWE, описанная выше методика учитывает основные факторы влияния подстилающей поверхности на снегонакопление и снеготаяние. Однако принятые эмпирические коэффициенты могут различаться в зависимости от территории и метеорологических условий. Важным ограничением методики является то, что в ней не учитываются высота и плотность снежного покрова. Только одна переменная (SWE) может быть сопоставлена с данными модели SnoWE и снегомерных съемок.

2.3. Метеорологические особенности рассматриваемого периода

Рассматриваемые в данном исследовании два зимних сезона (2018/2019 и 2019/2020 гг.) существенно отличались по условиям снегонакопления.

В 2018 г. устойчивый снежный покров на большей части водосбора р. Камы сформировался в конце второй декады ноября, а в горах Северного и Среднего Урала — в последней пятидневке октября. Зимний период 2018/2019 гг. отличался малым количеством дней с оттепелью (со среднесуточной температурой выше 0 °С), при этом максимум осадков был смещен на вторую половину сезона. В декабре количество осадков на большей части водосбора составило 30–60 % от нормы, в январе — 100–150 % от нормы (локально по северу до 200 %), а в феврале — 120–200 % от нормы. Максимум SWE на равнинной части бассейна сформировался к началу второй декады марта, а в горной части — в начале апреля. Снеготаяние на юге территории (в бассейне р. Белой) началось в третьей пятидневке марта, на остальной территории (за исключением горной части) — в третьей декаде марта. Наиболее интенсивное снеготаяние в южной части водосбора наблюдалось в конце первой — начале второй декады апреля. Похолодание во второй половине апреля привело к задержке снеготаяния в северной части бассейна и в горах. Здесь сход снега произошел в первой декаде мая при резком потеплении, что привело к формированию высокого пика половодья на реках Северного Урала (svgimet.ru, n. d.).

Зимний сезон 2019/2020 гг. отличался аномально высоким температурным фоном (в среднем по бассейну р. Камы на 6–7 °С выше климатической нормы). Число

дней с оттепелью в период с декабря по февраль составило 15–20 по северной части бассейна, 30–35 дней на западе и до 40 дней на юге и юго-западе бассейна р. Камы. При этом в течение всего периода снегонакопления наблюдался избыток осадков (120–150% от нормы), за исключением отдельных районов в юго-западной части бассейна.

Установление снежного покрова в северо-восточной части бассейна р. Камы в 2019 г. произошло в последней пятидневке октября. При этом за период с 28 октября по 13 ноября по данным метеостанций на данной территории выпало до 103 мм осадков, в основном в виде снега. На остальной территории снежный покров сформировался в конце ноября — начале декабря. По юго-западу бассейна р. Камы он неоднократно разрушался по причине оттепелей, вплоть до третьей декады января. Уже в конце февраля из-за продолжительной оттепели SWE начал сокращаться в юго-западной части территории.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Оценка достоверности расчета сумм осадков по моделям ICON и GFS

Результаты сопоставления месячных сумм осадков с данными моделей ICON и GFS приведены на рис. 3. В большинстве месяцев среднее количество осадков по модели ICON отличалось от среднего количества осадков по данным метеостанций не более чем на 10%. Исключением стал февраль 2019 г., когда завышение составило 12%. В трех случаях среднее количество осадков по модели ICON было меньше фактического. В свою очередь, модель GFS систематически завышала месячную сумму осадков. В марте и апреле 2019 г. среднее количество осадков по модели ока-

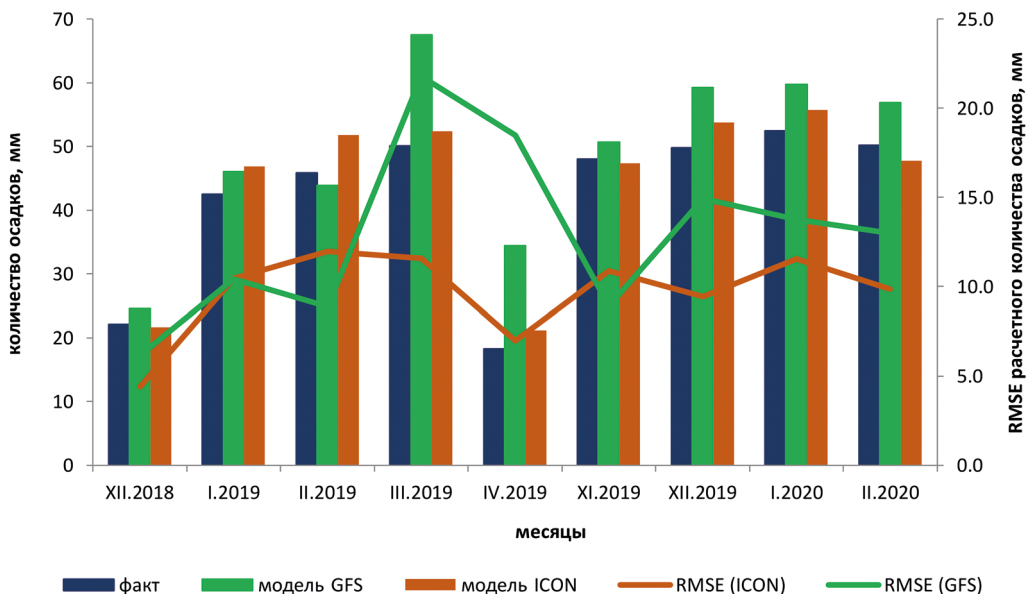


Рис. 3. Соотношение фактических месячных сумм осадков с результатами расчетов по моделям ICON и GFS

залось завышено более чем на 20 % в сравнении с данными метеостанций. Таким образом, максимальное завышение наблюдалось в весенние месяцы, что соответствует результатам, ранее полученным по модели WRF при использовании начальных данных GFS (Ряпков et al., 2018). Среднеквадратичная ошибка (RMSE) расчета месячных сумм осадков различалась от 4.4 мм (в декабре 2019 г. по модели ICON) до 21.8 мм (по модели GFS в марте 2019 г.) и в большинстве случаев не превышала 13 мм. В среднем, RMSE по модели GFS также оказалась выше, чем по модели ICON, причем наибольшие различия между двумя моделями отмечались именно в марте и апреле 2020 г.

3.2. Сопоставление результатов расчета SWE по моделям GFS, ICON и SnoWE

Сопоставление результатов расчета по трем моделям производилось для метеостанций, расположенных на территории бассейна р. Камы. Поскольку в горной части бассейна находится всего несколько метеостанций, полученные значения SWE могут быть существенно ниже фактических средних по всему бассейну. Результаты сопоставления приведены на рис. 4.

В период снегонакопления 2018/2019 гг. средние значения SWE по бассейну р. Камы, рассчитанные по модели SnoWE, были выше на 10–18 мм соответствующих значений, вычисленных по моделям ICON и GFS. В основном эта разница формировалась за счет южной части бассейна. Также различаются даты формирования максимумов снегонакопления. По модели SnoWE максимум наблюдался на 3–5 дней раньше, чем при использовании данных ICON и GFS. Вероятно, это связано с тем, что в расчетах по модели SnoWE учитывается высота снежного покрова, измеренная на метеостанциях (которая начинает уменьшаться при первых оттепелях). Согласно результатам расчета по моделям ICON и GFS, максимум SWE в бассейне р. Камы сформировался только к середине марта 2019 г. При этом средние по бассейну значения SWE по моделям SnoWE и GFS оказались примерно равны, а по модели ICON — на 7–8 % меньше.

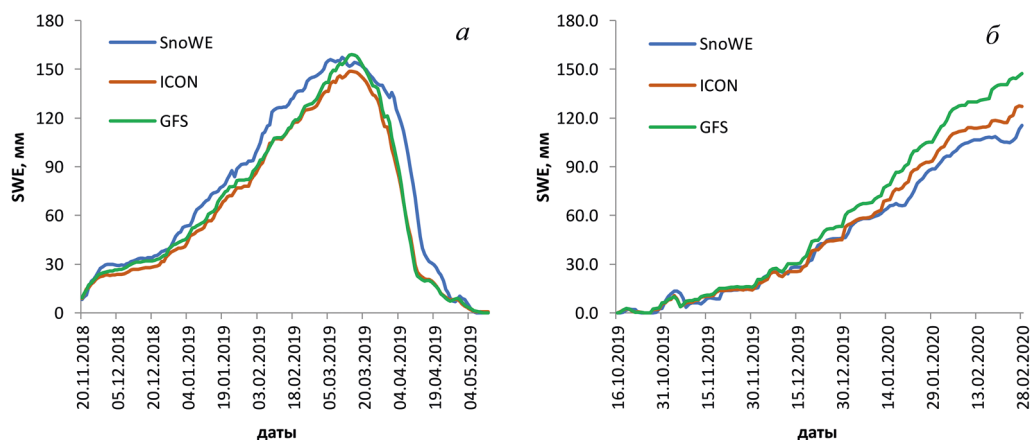


Рис. 4. Динамика среднего по пунктам наблюдений расчетного SWE в бассейне р. Камы по моделям GFS, ICON и SnoWE: 2018/2019 гг. (а), 2019/2020 гг. (б)

В период весеннего снеготаяния сокращение SWE по данным моделей ICON и GFS происходило значительно быстрее, чем по данным модели SnoWE. Разность между результатами расчета по моделям ICON и GFS (с одной стороны) и SnoWE (с другой стороны) резко увеличилась и достигла 40–45 мм в первой декаде апреля.

В холодный период 2019/2020 гг. наблюдалась обратная ситуация — средние значения SWE по модели SnoWE оказались меньше, чем по модели ICON и особенно по GFS (рис. 4, б). Величина расхождения увеличивалась в течение холодного периода и достигла к концу февраля 30 и 13 мм соответственно при сравнении SnoWE/GFS и SnoWE/ICON. Вероятно, занижение SWE по модели SnoWE обусловлено оттепелями. В периоды оттепелей (с 16 по 20 января и с 18 по 23 февраля) значение SWE по модели SnoWE уменьшалось, в то время как по другим моделям продолжался рост. Высота снежного покрова по данным метеостанций в эти периоды также снижалась. Расхождение величины влагозапаса снега по моделям ICON и GFS, очевидно, обусловлено различиями в количестве осадков (рис. 3).

3.3. Сравнение результатов моделирования с данными снегомерных съемок

Результаты расчета пространственного распределения SWE за 15.03.2019 (дата накопления максимальных снегозапасов за зимний сезон 2018/2019 гг.) показаны на рис. 5. Следует отметить, что данные модели SnoWE в сеточном формате за этот период отсутствуют. Они показаны на рис. 6 только по местоположению метео-

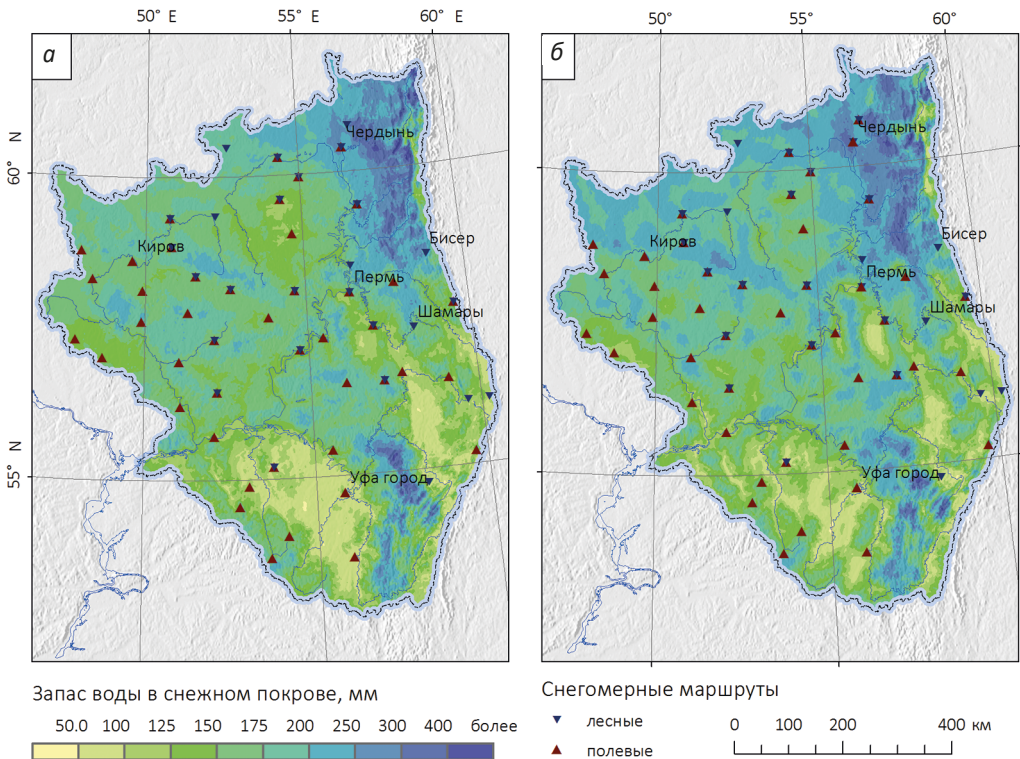


Рис. 5. Пространственное распределение расчетного SWE по моделям ICON (а) и GFS (б) на 15.03.2019

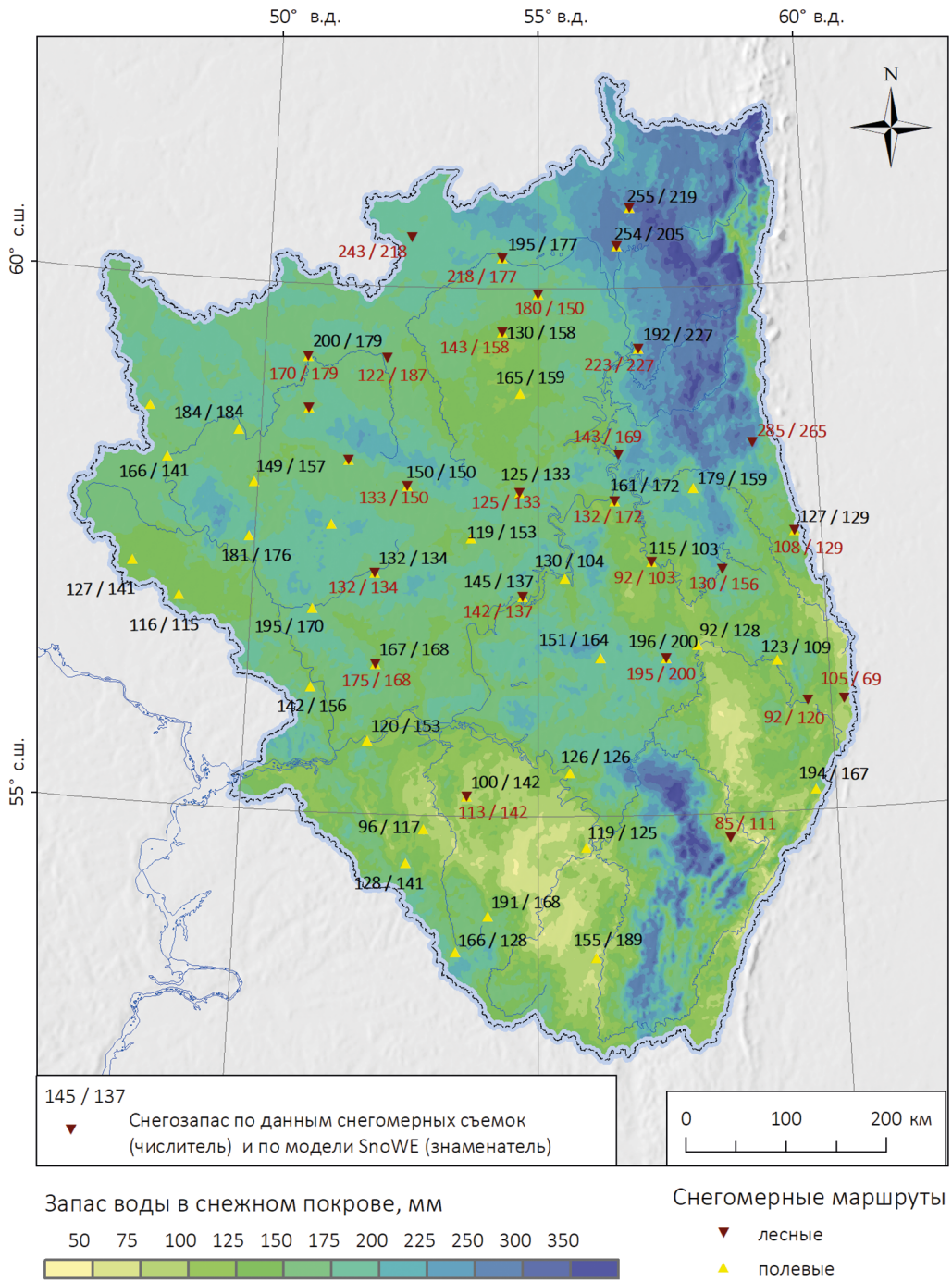


Рис. 6. Пространственное распределение расчетного SWE по данным модели ICON (количественный фон) в сравнении с результатами расчетов по модели SnOWE и данными снегомерных съемок по метеостанциям на 15.03.2019

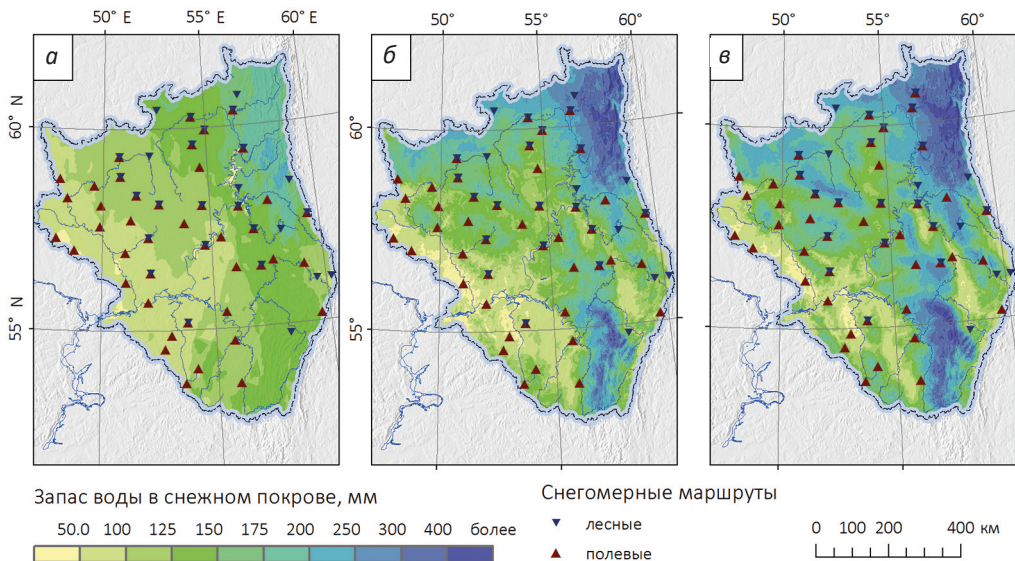


Рис. 7. Пространственное распределение расчетного SWE по моделям SnoWE (а), ICON (б) и GFS (в) на 29.02.2020

станций (вместе с данными снегомерных съемок). На рис. 7 приведены результаты расчета SWE по трем моделям за 28.02.2020 (дата максимального снегонакопления за зимний сезон 2019/2020 гг.)

Как следует из рис. 5 и 7, пространственное распределение SWE по модели SnoWE более равномерное, чем по данным моделей ICON и GFS. Модель SnoWE недооценивает снегонакопление в горной части бассейна, поскольку не учитывает влияние рельефа на снегонакопление. В свою очередь, при расчетах по моделям ICON и особенно по GFS формируются два максимума снегонакопления — на северо-востоке бассейна (в горах и предгорьях Северного Урала) и на Южном Урале. Оба максимума были лучше выражены в холодный период 2019/2020 гг. в связи с выпадением большого количества осадков в этих районах.

В то же время проверка полученных данных для горных районов затруднительна по причине недостатка снегомерных наблюдений. Приведенное на рис. 8 сопоставление расчетных и фактических сведений о распределении SWE по отдельным станциям, расположенным в разных частях бассейна р. Камы, указывает на то, что снегонакопление в горной части (метеорологическая станция Бисер) недооценивается всеми рассмотренными моделями, особенно в весенний период. Местоположение самих станций показано на рис. 6.

Существенные различия в условиях снегонакопления в холодный период 2018/2019 и 2019/2020 гг. повлияли на точность расчетов SWE по моделям. В зимний сезон 2018/2019 гг. значительных систематических расхождений между рассчитанными и фактическими значениями SWE на полевых маршрутах не наблюдалось. На лесных маршрутах SWE по модели GFS оказался в среднем на 20 мм выше, чем по данным маршрутных снегомерных наблюдений, что объясняется систематическим завышением количества осадков по этой модели.

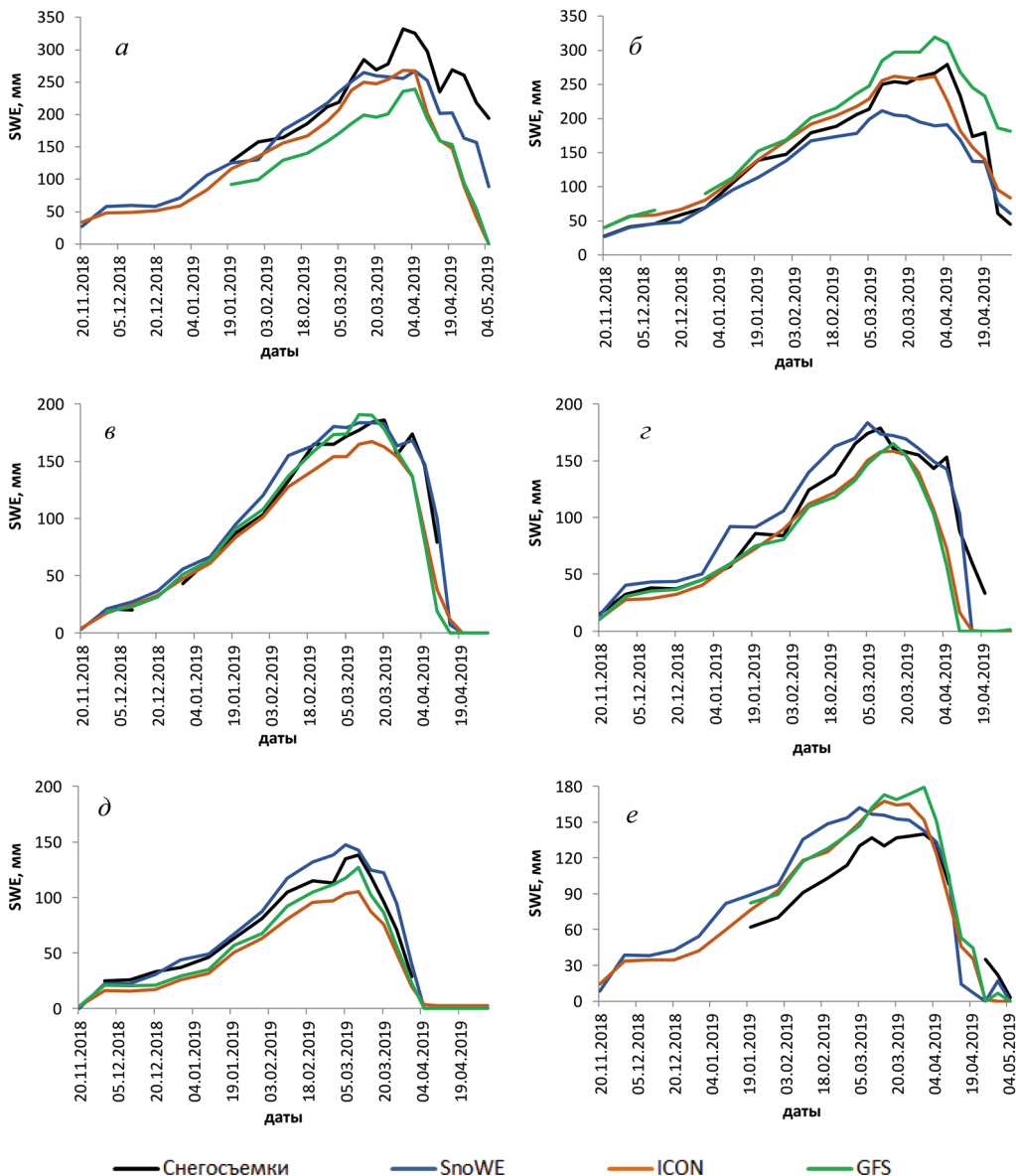


Рис. 8. Динамика расчетных и фактических значений SWE за холодный период на отдельных снегомерных маршрутах: Бисер, лес (а), Черынь, поле (б), Киров, поле (в), Пермь, поле (г), Уфа, поле (д), Шарары, лес (е)

За период снегонакопления в 2018/2019 гг. практически не было оттепелей, поэтому относительная ошибка расчетов SWE уменьшалась вплоть до середины марта. К моменту максимального снегонакопления RMSE составляла всего 14–18 % от среднего фактического значения SWE при расчете по моделям ICON и SnoWE для полевых снегомерных маршрутов (рис. 9). Такая величина ошибки существенно меньше, чем полученная ранее при расчетах по модели WRF (Pyankov et al., 2018).

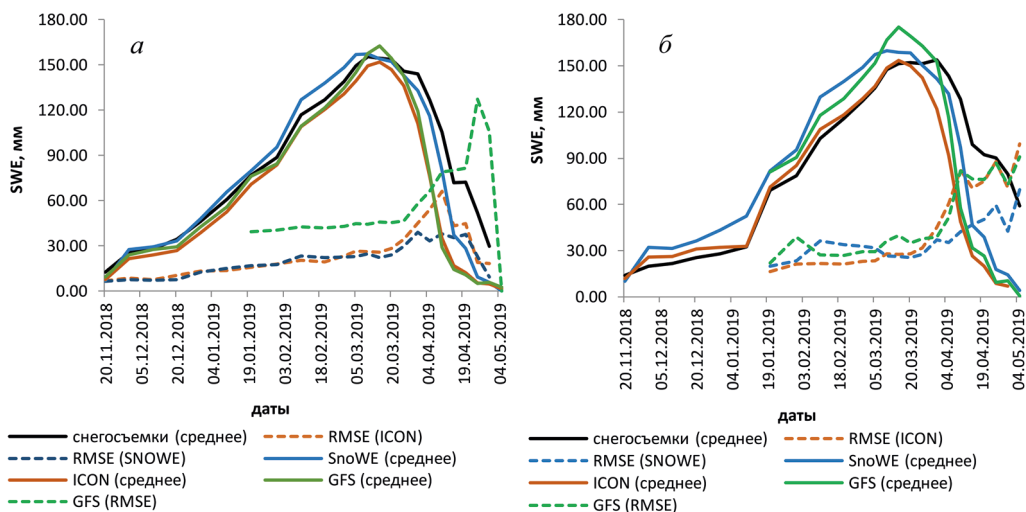


Рис. 9. Сопоставление расчетных и фактических значений SWE по полевым (а) и лесным (б) снегомерным маршрутам в холодный период 2018/2019 гг. (среднее значение по пунктам снегомерных съемок)

При этом ошибка расчета по модели GFS оказалась существенно выше (25–30 % от фактического значения SWE). Для лесных снегомерных маршрутов относительная ошибка расчетов в период максимального снегонакопления составила 17–18 % по моделям ICON и SnoWE (рис. 9).

При расчете по моделям ICON и GFS интенсивность снеготаяния и сублимации с поверхности снежного покрова была существенно завышена. На это указывает тот факт, что в период весеннего снеготаяния (начиная с третьей декады марта) расчетные значения SWE сокращались значительно быстрее фактических значений. Подобная закономерность характерна как для полевых, так и для лесных снегомерных маршрутов. В результате относительная ошибка расчетов в весенний период резко возросла. Точность расчетов SWE по модели SnoWE (в которой происходит коррекция по фактическим измерениям с метеостанций) оказывается значительно выше, чем по моделям ICON и GFS.

Для лесных снегомерных маршрутов потери снега на таяние и сублимацию в весенний период переоцениваются сильнее, чем для полевых. Это может быть связано с несколькими факторами, в том числе с локальными особенностями расположения снегомерных маршрутов, которые не удастся учесть при расчетах для крупного речного бассейна. Кроме того, существенное влияние может оказывать отсутствие точных координат снегомерных маршрутов. Также при расчетах не удастся корректно учесть фактор лесистости территории (долю леса в ячейке).

В зимний сезон 2019/2020 гг. величина RMSE и ее отношение к средним фактическим значениям SWE оказалась существенно выше, чем в 2018/2019 гг. (рис. 10). Это, очевидно, обусловлено высокой частотой оттепелей, которая является важнейшим фактором, влияющим на достоверность расчета SWE (Чурюлин и др., 2018). Оттепели оказывали большее влияние на точность расчетов SWE на полевых снегомерных маршрутах, многие из которых расположены в южной и западной частях бассейна (где частота оттепелей была значительно выше). В результате

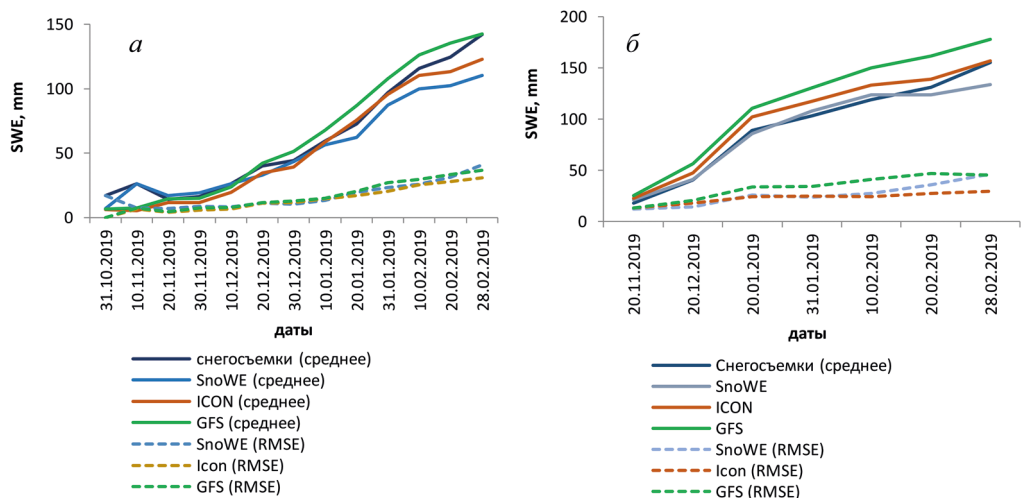


Рис. 10. Сопоставление расчетных и фактических значений SWE по полевым (а) и лесным (б) снегомерным маршрутам в холодный период 2019/2020 гг. (среднее значение по пунктам снегомерных съемок)

к 29.02.2020 отношение RMSE к среднему фактическому снегозапасу для полевых маршрутов составляло от 22 % (по модели ICON) до 28 % (по модели SnoWE). При этом модель SnoWE с января 2020 г. систематически занижала SWE. К 29.02.2020 величина занижения достигла почти 30 мм в среднем по полевым маршрутам. По модели ICON значение SWE также недооценивалось (в среднем на 20 мм), а по модели GFS наблюдалось его незначительное завышение.

Для лесных снегомерных маршрутов, расположенных в основном в северной части бассейна, частота оттепелей была ниже и точность расчетов оказалась выше, чем для полевых снегомерных маршрутов. При этом минимальная величина ошибок была получена при расчетах на основе данных модели ICON (RMSE составляла 19.2 % от средних фактических значений SWE). При расчетах по модели GFS запас воды в снеге переоценивался в среднем на 15–20%, а отношение RMSE к среднему фактическому SWE составило около 28 %. По модели SnoWE в первой половине периода снегонакопления были получены наиболее достоверные результаты. Однако во второй половине февраля модель SnoWE начала систематически занижать SWE по причине наличия оттепелей и уменьшения высоты снежного покрова на метеостанциях.

Представляет интерес также распределение ошибок расчета SWE по территории исследования. В холодный период 2018/19 гг. все модели занижали SWE в горной части бассейна (по крайней мере, для метеостанции Бисер). В равнинной части значение SWE также недооценивалось при расчете по модели ICON в южной части бассейна, что, вероятно, связано с завышением потерь снега на сублимацию. Модель SnoWE наиболее адекватно воспроизводила SWE в центральной части бассейна (рис. 8, в, з), но при этом местами по югу исследуемой территории имело место завышение (рис. 8, д, е) а по северу, наоборот, занижение (рис. 8, б). Запас воды в снеге по модели GFS существенно переоценивался в отдельных частях бассейна, где модель завышала количество выпавших атмосферных осадков.

В холодный период 2019/2020 гг. модель SnoWE значительно недооценивала SWE в северной и горной частях бассейна в сравнении с данными ICON и GFS (рис. 7). Также занижение SWE по данным всех трех моделей наблюдалось в юго-западной части бассейна, где была переоценена интенсивность таяния снега при оттепелях.

4. Заключение

В результате проведенного исследования на примере бассейна р. Камы выявлены основные преимущества и ограничения двух методов расчета запаса воды в снежном покрове: модели SnoWE, разработанной в Гидрометцентре РФ, и эмпирической методики, разработанной для бассейна р. Камы. Оба метода основаны на комбинировании данных моделей ЧПП и оперативных наблюдений метеостанций. При этом основным преимуществом модели SnoWE является технология ежедневной коррекции расчетных характеристик снежного покрова по данным метеостанций, позволяющая устранить проблему накопления ошибок в модели. Преимуществами второго метода является более высокое пространственное разрешение и учет факторов подстилающей поверхности, а также реализация расчетов в среде ГИС с возможностью публикации на картографическом веб-сервисе.

Результаты расчета SWE по моделям существенно различаются. По модели SnoWE в целом более достоверно воспроизводится SWE в равнинной части бассейна р. Камы, особенно по югу территории. Важным ее преимуществом является также более корректное воспроизведение SWE в период снеготаяния. В то же время в северной части бассейна и на востоке (в пределах Уральских гор) модель SnoWE существенно занижает SWE. Причиной занижения SWE в горной части бассейна является тот факт, что модель SnoWE в явном виде не учитывает увеличение снегонакопления с высотой местности, причины занижения в северных равнинных районах требуют дополнительного изучения. Однако стоит отметить, что данное занижение сильнее проявилось в холодный период 2019/2020 гг., когда на данной территории выпало существенно больше осадков, чем в холодный период 2018/2019 гг.

Эмпирическая методика, основанная на использовании данных моделей ICON и GFS, дает более неоднородную и реалистичную оценку распределения SWE по площади бассейна, чем соответствующая оценка по данным модели SnoWE. Также выше точность оценки SWE по его северной части. В то же время в весенний период 2018/2019 гг. существенно переоценивалась интенсивность снеготаяния и сублимации с поверхности снега, в результате чего величина ошибок расчета с конца марта резко увеличивалась. В целом более высокая точность расчета SWE получена при использовании данных модели ICON. Модель GFS в ряде случаев существенно завышала количество осадков и, как следствие, запас воды в снеге в отдельных частях бассейна.

В период максимального снегонакопления величина RMSE (по всем трем моделям) составила от 14 до 28% от среднего фактического значения SWE. В холодный период 2018/2019 гг. точность расчетов оказалась значительно выше, чем в 2019/2020 гг., что обусловлено отсутствием оттепелей. В целом, полученные оценки точности можно считать удовлетворительными.

Стоит отметить, что оба метода в настоящее время используются в квазиоперативном режиме: модель SnoWE — для расчета характеристик снежного покрова на всей территории России, а эмпирическая методика — для расчетов по бассейну р. Камы с последующей публикацией данных на картографическом веб-сервисе <http://hydromonitor.maps.psu.ru/>.

Литература

- svgimet.ru. (n. d.). *Неблагоприятная паводковая обстановка в Прикамье*. [online] Доступно на: <http://svgimet.ru/?p=34132> [Дата доступа 19.02.2021].
- Виноградов, Ю. Б., Виноградова, Т. А. (2010). *Математическое моделирование в гидрологии*. Москва: Издательский центр «Академия».
- Казакова, Е. В. (2015). *Ежедневная оценка локальных значений и объективный анализ характеристик снежного покрова в рамках системы численного прогноза погоды COSMO-Ru*. Диссертация ... канд. физ.-мат. наук.
- Кузьмин, П. П. (1961). *Процесс таяния снежного покрова*. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Мотовилов, Ю. Г., Гельфан, А. Н. (2018). *Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов*. Москва: ИВП РАН.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам*. (1985). Вып. 3. Ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Справочники по климату СССР (1965–1974)*. Вып. 1–34. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Турков, Д. В., Сократов, В. С. (2016). Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области. *Лёд и Снег*, 56 (3), 369–380. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-369-380>
- Чурюлин, Е. В. (2019). *Использование спутниковой и модельной информации о снежном покрове при расчетах характеристик весеннего половодья*. Диссертация ... канд. геогр. наук.
- Чурюлин, Е. В., Копейкин, В. Н., Розинкина, И. А., Фролова, Н. Л., Чурюлина, А. Г. (2018). Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 2 (368), 120–143.
- Arino, O., Bicheron, P., Achard, F., Latham, J., Witt, R. and Weber, J.-L. (2008). GlobCover: the most detailed portrait of Earth. *European Space Agency Bulletin*, (136), 24–31.
- Bartalev, S. A., Ershov, D. V., Isaev, A. S., Potapov, P. V., Turubanova, S. A. and Yaroshenko, A. Yu. (2004). *Russia's Forests — Dominating Forest Types and Their Canopy Density*. Moscow: Greenpeace Russia and RAS Centre for Forest Ecology and Productivity. Map. Scale 1:14 000 000.
- Bellaire, S., Jamieson, J. B. and Fierz, C. (2011). Forcing the snow-cover model SNOWPACK with forecasted weather data. *The Cryosphere*, 5, 1115–1125. <https://doi.org/10.5194/tc-5-1115-2011>
- Bellaire, S., van Herwijnen, A., Mitterer, C. and Schweizer, J. (2017). On forecasting wet-snow avalanche activity using simulated snow cover data. *Cold Regions Science and Technology*, 144, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.09.013>
- Churiulin, E. V., Krylenko, I. N., Frolova, N. L. and Belyaev, B. M. (2019). Research of opportunities of combined use of the runoff formation ECOMAG model and mesoscale atmosphere circulation COSMO-Ru model (on the example of floods on the Sukhona River at the Velikiy Ustyug). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 263 (1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/263/1/012057>
- Kalinin, N. A., Shikhov, A. N. and Sviyazov, E. M. (2015). Simulation of snow accumulation and melt in the Votkinsk Reservoir catchment using the WRF-ARW model. *Russian Meteorology and Hydrology*, 40 (11), 749–757. <https://doi.org/10.3103/S1068373915110059>
- Kazakova, E. V., Chumakov, M. M. and Rozinkina, I. A. (2015). 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*, 40 (5), 296–304. <https://doi.org/10.3103/S1068373915050027>
- Kuchment, L. S., Gelfan, A. N. and Demidov, V. N. (2000). A distributed model of runoff generation in the permafrost regions. *Journal of Hydrology*, 240, 1–22. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00318-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00318-8)

- Kuchment, L. S., Romanov, P. Yu., Gelfan, A. N. and Demidov, V. N. (2010). 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 sciences*, 14 (2), 339–350. <https://doi.org/10.5194/hess-14-339-2010>
- Motovilov, Yu., Gottschalk, L., Engeland, K. and Belokurov, A. (1999). *ECOMAG — regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region*. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series.
- Pyankov, S. V., Kalinin, N. A., Shikhov, A. N., Abdullin, R. K. and Bykov, A. V. (2019). Simulation of snow cover formation and melt with publication of the output data on the web map service (on the example of Kama river basin). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 321, 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/321/1/012009>
- Pyankov, S. V., Shikhov, A. N., Kalinin, N. A. and Sviyazov, E. M. (2018). A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin. *Journal of Geographical Sciences*, 28 (2), 221–237. <https://doi.org/10.1007%2Fs11442-018-1469-x>
- Quéno, L., Vionnet, V., Dombrowski-Etchevers, I., Lafaysse, M., Dumont, M. and Karbou, F. (2016). Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometeric-resolution meteorological forecasts. *The Cryosphere*, 10, 1571–1589. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1571-2016>
- Verbunt, M., Zappa, M., Gurtz, J. and Kaufmann, P. (2006). Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin. *Journal of Hydrology*, 324, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.036>
- Vionnet, V., Dombrowski-Etchevers, I., Lafaysse, M., Quéno, L., Seity, Y. and Bazile, E. (2016). Numerical weather forecasts at kilometer scale in the French Alps: Evaluation and application for snowpack modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 17 (10), 2591–2614. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0241.1>
- wgne.meteoinfo.ru. (n. d.). *WGNE Overview of Plans at NWP Centres with Global Forecasting Systems*. [online] Доступно на: <http://wgne.meteoinfo.ru/nwp-systems-wgne-table/wgne-table/> [Дата доступа 19.02.2021].

Статья поступила в редакцию 30 марта 2020 г.
Статья рекомендована к печати 14 декабря 2020 г.

Контактная информация:

Шихов Андрей Николаевич — and3131@inbox.ru
Чурюлин Евгений Викторович — evgenychur@gmail.com
Абдуллин Ринат Камилевич — rinaha-26@mail.ru

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)*

A. N. Shikhov¹, E. V. Churiulin^{2,3}, R. K. Abdullin¹

¹ Perm State University,

15, ul. Bukireva, Perm, 614990, Russian Federation

² Hydrometeorological Centre of Russia,

11–13, Bolshoy Predtechensky per., Moscow, 123242, Russian Federation

³ Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

For citation: Shikhov, A. N., Churiulin, E. V., Abdullin, R. K. (2021). Assessment of the accuracy of snow water equivalent calculation with the use of global numerical weather prediction models and

* The study was funded by the RF President Grant Number MK-313.2020.5 and RFBR grant 17-05-01001-a.

The paper discusses the results of snow cover formation and snowmelt modeling in the Kama River basin ($S = 507 \text{ km}^2$) using two approaches previously developed by the authors. The first one is the SnoWE snowpack model developed at the Hydrometeorological Center of the Russian Federation and used in quasi-operational mode since 2015, and the second is a GIS-based empirical technique which was previously implemented for the Kama River basin. Both methods are based on a combination of numerical weather prediction (NWP) models' data with operational synoptic observations at the weather stations. The study was performed for the winter seasons 2018/2019 and 2019/2020. To assess the reliability of simulated snow water equivalent (SWE), we obtained in-situ data from 68 locations (snow survey routes) distributed over the entire area of the river basin. As a result of the study, the main advantages and limitations of the two methods for SWE calculation were identified. As for the maximum values of SWE, the root mean square error (RMSE) of simulated SWE ranges from 14 to 28 % of the average observed SWE according to in-situ data. It was found that the SnoWE model more reliably reproduces SWE in the lowland part of the river basin. Simultaneously, SWE was substantially underestimated according to the SnoWE model in the northern and mountainous parts of the basin. The second method provides a more realistic estimate of the spatial distribution of SWE over the area, as well as a higher accuracy of calculation for the northern part of the river basin. The main drawback of the method is the substantial overestimation of the intensity of snowmelt and snow sublimation. Consequently, the accuracy of SWE calculations sharply decreases in the spring season. SWE calculation accuracy in the winter season 2019/2020 was substantially lower than in 2018/2019 due to frequent thaws.

Keywords: snow cover, snow water equivalent, numerical weather prediction models, SnoWE snowpack cover model, GIS technologies, Kama river basin.

References

- Arino, O., Bicheron, P., Achard, F., Latham, J., Witt, R. and Weber, J.-L. (2008). GlobCover: the most detailed portrait of Earth. *European Space Agency Bulletin*, (136), 24–31.
- Bartalev, S. A., Ershov, D. V., Isaev, A. S., Potapov, P. V., Turubanova, S. A. and Yaroshenko, A. Yu. (2004). *Russia's Forests — Dominating Forest Types and Their Canopy Density*. Moscow: Greenpeace Russia and RAS Centre for Forest Ecology and Productivity. Map. Scale 1:14 000 000.
- Bellaire, S., Jamieson, J. B. and Fierz, C. (2011). Forcing the snow-cover model SNOWPACK with forecasted weather data. *The Cryosphere*, 5, 1115–1125. <https://doi.org/10.5194/tc-5-1115-2011>
- Bellaire, S., van Herwijnen, A., Mitterer, C. and Schweizer, J. (2017). On forecasting wet-snow avalanche activity using simulated snow cover data. *Cold Regions Science and Technology*, 144, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.09.013>
- Churiulin, E. V., Krylenko, I. N., Frolova, N. L. and Belyaev, B. M. (2019). Research of opportunities of combined use of the runoff formation ECOMAG model and mesoscale atmosphere circulation COSMO-Ru model (on the example of floods on the Sukhona River at the Velikiy Ustyug). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 263 (1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/263/1/012057>
- Churyulin, E. V. (2019). *Using satellite-based and simulated snow cover information for calculating spring flood characteristics*. PhD thesis. (In Russian)
- Churyulin, E. V., Kopeikin, V. N., Rozinkina, I. A., Frolova, N. L. and Churyulina, A. G. (2018). Analysis of snow cover characteristics by satellite and model data for various basins in the European territory of the Russian Federation. *Hydrometeorological studies and forecasts*, 2 (368), 120–143. (In Russian)
- Guideline for hydro-meteorological stations and gauges*. (1985). Vol. 3. Part 1. Meteorological observations at weather stations. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Kalinin, N. A., Shikhov, A. N. and Sviyazov, E. M. (2015). Simulation of snow accumulation and melt in the Votkinsk Reservoir catchment using the WRF-ARW model. *Russian Meteorology and Hydrology*, 40 (11), 749–757. <https://doi.org/10.3103/S1068373915110059>

- Kazakova, E. V. (2015). *Daily assessment of local values and objective analysis of snow cover characteristics in the framework of the COSMO-Ru numerical weather forecast system*. PhD thesis. (In Russian)
- Kazakova, E. V., Chumakov, M. M. and Rozinkina, I. A. (2015). 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*, 40 (5), 296–304. <https://doi.org/10.3103/S1068373915050027>
- Kuchment, L. S., Gelfan, A. N. and Demidov, V. N. (2000). A distributed model of runoff generation in the permafrost regions. *Journal of Hydrology*, 240, 1–22. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00318-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00318-8)
- Kuchment, L. S., Romanov, P. Yu., Gelfan, A. N. and Demidov, V. N. (2010). 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 sciences*, 14 (2), 339–350. <https://doi.org/10.5194/hess-14-339-2010>
- Kuzmin, P. P. (1961). *The process of snow cover melting*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Motovilov, Yu., Gottschalk, L., Engeland, K. and Belokurov, A. (1999). *ECOMAG — regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region*. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series.
- Motovilov, Yu. G. and Gelfan, A. N. (2018). *Models of runoff formation for the challenges of river basins hydrology*. Moscow: Water problem Institute of RAS Press. (In Russian)
- Pyankov, S. V., Kalinin, N. A., Shikhov, A. N., Abdullin, R. K. and Bykov, A. V. (2019). Simulation of snow cover formation and melt with publication of the output data on the web map service (on the example of Kama river basin). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 321, 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/321/1/012009>
- Pyankov, S. V., Shikhov, A. N., Kalinin, N. A. and Sviyazov, E. M. (2018). A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin. *Journal of Geographical Sciences*, 28 (2), 221–237. <https://doi.org/10.1007%2Fs11442-018-1469-x>
- Quéno, L., Vionnet, V., Dombrowski-Etchevers, I., Lafaysse, M., Dumont, M. and Karbou, F. (2016). Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometeric-resolution meteorological forecasts. *The Cryosphere*, 10, 1571–1589. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1571-2016>
- Reference books on the climate of the USSR*. (1965–1974). Iss. 1–34. Leningrad: Hydrometeoizdat Publ. (In Russian)
- svgimet.ru. (n. d.). *Neblagopriatnaia pavodkovaia obstanovka v Prikam'e*. [online] Available at: <http://svgimet.ru/?p=34132> [Accessed Feb. 19, 2021]. (In Russian)
- Turkov, D. V. and Sokratov, V. S. (2016). Calculation of the snow cover characteristics for lowland areas using the SPONSOR model of local heat and moisture exchange and reanalysis data on the example of the Moscow region. *Ice and Snow*, 56 (3), 369–380. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-369-380> (In Russian)
- Verbunt, M., Zappa, M., Gurtz, J. and Kaufmann, P. (2006). Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin. *Journal of Hydrology*, 324, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.036>
- Vinogradov, Yu. B. and Vinogradova, T. A. (2010). *Mathematical modeling in hydrology*. Moscow: Publishing House Academia. (In Russian)
- Vionnet, V., Dombrowski-Etchevers, I., Lafaysse, M., Quéno, L., Seity, Y. and Bazile, E. (2016). Numerical weather forecasts at kilometer scale in the French Alps: Evaluation and application for snowpack modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 17 (10), 2591–2614. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0241.1>
- wgne.meteoinfo.ru. (n. d.). *WGNE Overview of Plans at NWP Centres with Global Forecasting Systems*. [online] Available at: <http://wgne.meteoinfo.ru/nwp-systems-wgne-table/wgne-table/> [Accessed Feb. 19, 2021].

Received: March 30, 2020

Accepted: December 14, 2020

Contact information:

Andrey N. Shikhov — and3131@inbox.ru

Evgenii V. Churiulin — evgenychur@gmail.com

Rinat K. Abdullin — rinaha-26@mail.ru