

Точность воспроизведения межгодовой изменчивости снегозапасов Восточно-Европейской равнины по данным спутниковой информации на примере продукта GlobSnow (SWE)

Л. М. Китаев, Т. Б. Титкова, Д. В. Турков

*Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: lkitaev@mail.ru*

Исследованы особенности воспроизведения многолетней изменчивости снегозапасов Восточно-Европейской равнины данными, восстановленными по спутниковой информации, на примере продукта GlobSnow (SWE) второй версии (Европейское космическое агентство). Изменчивость восстановленных данных рассматривается в сравнении с изменчивостью фактических данных метеорологических станций и данных, рассчитанных моделью SPONSOR (Институт географии РАН). Рассчитанные по модели и восстановленные по спутниковой информации снегозапасы превышают по величине фактические, изменяясь при этом в пространстве соответственно смене зон, невязка относительно фактических данных остаётся высокой. Тем не менее, по данным разработчиков, теснота корреляционных связей расчётных и фактических данных реперных сезонов и лет высока, что, однако, не всегда обеспечивает сходство межгодовой изменчивости характеристик. Лучшие совпадения лет с аномальными фактическими снегозапасами отмечаются для характеристик, рассчитанных по модели; также в этом случае наблюдается сходство гармоник Фурье, особенно для открытых пространств лесостепей и степей.

Ключевые слова: снегозапасы, межгодовая и многолетняя изменчивость, фактические и модельные данные, спутниковая информация

Одобрена к печати: 10.02.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-164-175

Введение

Значительная неоднородность характеристик снежного покрова, занимающего в холодный период года обширные пространства в умеренных и высоких широтах, оказывает существенное влияние на характер взаимодействия процессов в атмосфере и на поверхности суши (Кузьмин, 1957; Snow..., 2008; Vavrus, 2007). Периоды потеплений и похолоданий последнего столетия сопровождаются динамичными изменениями в характере снегонакопления, что приводит к изменениям гидрологического режима и биоты (Ваганов и др., 1996; Киреева и др., 2018; Китаев, 2013; Николаев, Скачков, 2012; Попова и др., 2015). Всё вышеперечисленное указывает на необходимость усовершенствования методов мониторинга снегонакопления. Так, в частности, современный спутниковый микроволновый сканирующий радиометр EOS (AMSR-E) позволяет проводить сканирование поверхности с пространственным и временным разрешением, достаточным для оперативной и долгосрочной оценки гидрологических явлений. Вместе с тем пространственная неоднородность и временная трансформация снежной толщи, обусловленные неоднородностью ландшафтных условий и различиями в проявлении метеорологических явлений, могут рассматриваться среди основных причин несогласованности фактических и восстановленных по спутниковым данным снегозапасов (Петрушина, Голубев, 2005; Fierz, 1998; Kelly et al., 2003; Koenig, Forster, 2004). Возможность преодоления этих проблем может заключаться в том числе в комбинированном использовании наземных наблюдений и данных спутникового радиометра, что решается, в частности, посредством усовершенствованных алгоритмов расчёта в процессе подготовки продукта GlobSnow Snow Water Equivalent (SWE) второй версии.

Адекватность расчётов снегозапасов по данным спутниковых наблюдений рассматривалась многими исследователями. В большинстве случаев — для реперных точек и характерных

лет. В настоящей работе с целью уточнения неопределённости учёта в модельных алгоритмах пространственно-временной неоднородности характеристик снежной толщи нами была проведена оценка точности воспроизведения спутниковыми данными межгодовой изменчивости снежного покрова Восточно-Европейской равнины на примере продукта GlobSnow (SWE) второй версии.

Методология

Продукт GlobSnow второй версии, разработанный в рамках исследований Европейского космического агентства (European Space Agency — ESA), представляет собой базу данных, объединяющую восстановленные значения покрытия территории снежным покровом GlobSnow (SE) и водного эквивалента снега GlobSnow (SWE) по данным частотных каналов спутниковых радиометров 19 и 37 ГГц для периода с 1979 г. по настоящее время и с пространственным разрешением 25×25 км. Здесь мы рассматриваем восстановленные значения водного эквивалента снега (далее — снеготолщина) как характеристики снежного покрова, наиболее значимой для оценки изменчивости гидрологического режима, биоты и водно-физических свойств почвы, и, соответственно, важные с точки зрения хозяйственного использования территории.

Механизм восстановления значений снеготолщин основывается на использовании полупирической модели HUT (Helsinki University of Technology — Технологический институт Хельсинки, Финляндия). Модель описывает наблюдаемую радиояркостную температуру как функцию характеристик снежной толщи с учётом влияния атмосферы и состояния лесной растительности для ячеек 25×25 км на Северное полушарие (Pulliainen, Hallikainen, 2001). В качестве входных параметров используются наблюдаемые на метеорологических станциях толщина и плотность снега, размер зерна, приземная температура воздуха; в алгоритм расчёта встроены блоки, оценивающие теплообмен снежной толщи с подстилающей поверхностью и атмосферой и описывающие особенности снежной толщи после начала снеготаяния (Takala et al., 2009).

Отличительная особенность модели HUT второй версии состоит в дополнительном уточнении результатов: в процессе моделирования восстановленные данные оптимизируются на основе байесовского подхода с учётом интерполируемых в соответствующую сетку фактических данных, используемых в качестве входных параметров (прежде всего — размер зёрен) (Pulliainen, 2006). Кроме того, в модели существенно усовершенствован используемый ранее механизм оценки снеготолщин на залесенных территориях по спутниковым данным в оптическом диапазоне. В алгоритме SCAMod (Finnish Environment Institute — Институт окружающей среды, Финляндия) влияние леса учитывается с помощью эмпирической модели отражения снежного покрова, где в качестве параметров используются значения коэффициента отражения снега, леса и свободной от снега поверхности. Получаемые в результате коэффициенты проницаемости для лесной растительности позволяют уточнять в модели HUT степень влияния леса на отражательную способность снежной поверхности (Kruopis et al., 1999; Metsämäki et al., 2005). В итоге, по сведениям разработчиков продукта GlobSnow (SWE), точность восстановления снеготолщин улучшилась; в частности, отклонения восстановленных значений от фактических на Восточно-Европейской равнине составили 20–35 %. Максимальные погрешности при этом характерны для юго-запада региона, что, по мнению авторов продукта, может быть связано с повышенной здесь влажностью снега. Средняя квадратическая ошибка восстановленных снеготолщин (1) для Канады составляет 19–67 мм, что разработчики связывают с различиями по территории величины зёрен в снежной толще. Кроме того, при недоучёте проницаемости лесных массивов средняя квадратическая ошибка в определении снеготолщин может в отдельных случаях достигать 60 мм. Повысить точность расчётов в должной степени авторам алгоритма не удалось ввиду сложности оценки величины зёрен, наличия в снежной толще ледяных корок, значительной глубины снега (Pulliainen, 2006; Pulliainen, Hallikainen, 2001).

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_\tau - x_e)^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где x_τ , x_e — фактические и расчётные данные соответственно.

Как вариант оценки снегозапасов анализом характеристик снежной толщи, для сравнения с продуктом GlobSnow (SWE) нами рассмотрены результаты расчёта снегозапасов моделью SPONSOR (Институт географии РАН). Модель включает в себя описание процессов, вносящих наибольший вклад в формирование теплофизических характеристик снега, важных для описания взаимодействия снежного покрова с атмосферой и почвой. К ним относятся: образование нового слоя снега; изменение плотности слоёв снега в результате вязкого и ветрового уплотнения; изменение температуры слоёв снега за счёт теплообмена с атмосферой и почвой, а также поглощения солнечной радиации и фазовых переходов воды в толще снега; испарение, перенос талой воды и её вторичное замерзание; изменение влажности снега в результате таяния и просачивания талой воды в толщу, а также поглощения жидких осадков; изменение альбедо снега, а также свойств снега за счёт смены типа слоёв с учётом типа растительности. Для определения изменений температуры предусмотрено корректное описание изменяющейся теплопроводности и теплоёмкости снега. Важным свойством модели является то, что помимо толщины и водного эквивалента она позволяет одновременно рассчитывать и другие характеристики снежного покрова, прежде всего касающиеся его вертикальной структуры: распределение по глубине снежной толщи плотности, температуры, влажности снега и его типов (ледовые корки, глубинная изморозь, насыщенный влагой и т. п.) (Шмакин и др., 2009).

Достоинством текущей версии модели SPONSOR является использование в качестве входной информации данных реанализа ERA-Interim (ECMWF — European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды). Последний вариант используемого реанализа имеет усовершенствованную систему усвоения данных, горизонтальное разрешение $0,75 \times 0,75^\circ$, лучшую формулировку ограничений фоновых ошибок, обновлённый алгоритм анализа влажности, улучшенные физику модели и управление качеством данных; кроме того, здесь изменены процесс проверки сумм осадков и схема обработки коротковолновой радиации и облачности, введён новый метод анализа снежного покрова (Бокучава, Семенов, 2018; Попова и др., 2015; Хан и др., 2007; Uppala, Kallberg, 2005). Тестирование модели SPOBSOR с входными параметрами реанализа ERA-Interim для снегозапасов января Московской обл. выявил относительную ошибку (2) в диапазоне от 15 % на юге до –15 % на севере региона.

$$\tau = \frac{\Delta x}{x_{thru}}, \quad (2)$$

где Δx — разница вычисленного и фактического значений; x_{thru} — фактическое значение.

Таким образом, к достоинствам модели SPONSOR следует отнести более детальную в сравнении с продуктом GlobSnow (SWE) проработку особенностей формирования снежной толщи на основе использования в качестве входных параметров данных реанализа.

Оценка качества воспроизведения межгодовой изменчивости снегозапасов продуктом GlobSnow (SWE) и моделью SPONSOR проведена сравнением соответствующих рядов расчётных характеристик с данными наблюдений девяти метеорологических станций, расположенных в основных природных зонах Восточно-Европейской равнины (рис. 1): Ловозеро (лесотундра), Калева, Усть-Цильма, Вытегра, Опарино (тайга), Сухиничи (смешанные леса), Порецкое, Калач, Амбулак (степи и лесостепи). Для точки расположения каждой станции согласно датам снегомерных маршрутных наблюдений формировались ряды суточных данных модели и спутника на период 1979–2016 гг. для января и февраля — как месяцев с максимальными снегозапасами, наиболее значимыми для годового гидрологического цикла. Погрешность осреднения фактических данных, полученных метеорологическими станциями Восточно-Европейской равнины, не превышает 10 % (Кислов и др., 2001).

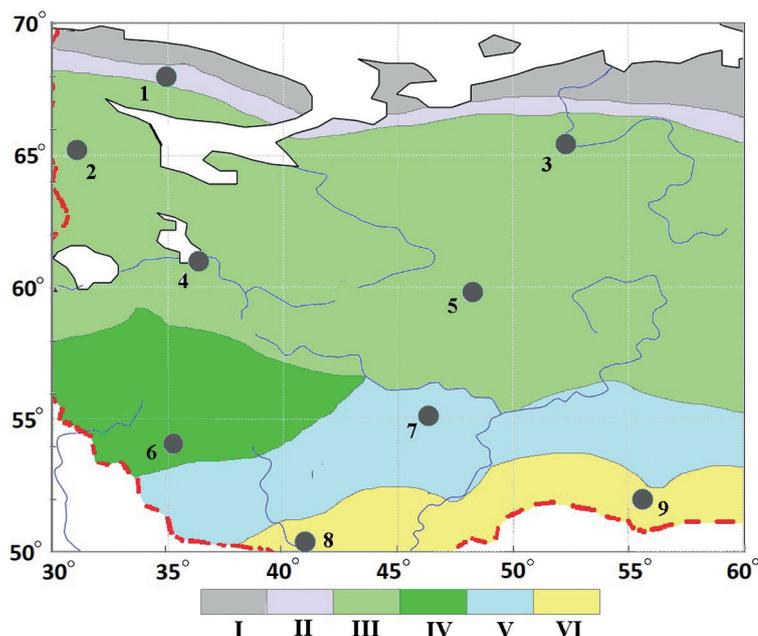


Рис. 1. Расположение точек, рассмотренных в ходе анализа. Метеорологические станции: 1 — Ловозеро, 2 — Калевала, 3 — Усть-Цильма, 4 — Вытегра, 5 — Опарино, 6 — Сухиничи, 7 — Порецкое, 8 — Калач, 9 — Амбулак. Природные зоны: I — тундра, II — лесотундра, III — тайга, IV — смешанные и широколиственные леса, V — лесостепь, VI — степь

Изменчивость фактических и восстановленных снегозапасов

В данном случае мы рассматриваем многолетние ряды осреднённых суточных значений января и февраля для периода 1979–2016 гг. Как видно из *табл. 1*, восстановленные по спутниковым данным и рассчитанные по модели значения снегозапасов, соответствуя общей зональной изменчивости, на залесенных территориях в основном превышают фактические значения метеорологических станций, за исключением расположенных на западе таёжных территорий Калева и Вытегра. Для открытых степных пространств характерно занижение восстановленных по спутниковой информации снегозапасов. Стандартное отклонение значений, рассчитанных по модели, в большинстве случаев превышает стандартное отклонение восстановленных по спутнику данных. Стандартное отклонение фактических данных максимально для зоны тайги, что соответствует особенностям рассчитанных значений. Коэффициенты многолетних трендов во всех случаях незначимы, что в целом соответствует современным тенденциям в изменчивости снегозапасов.

Сравнительный анализ снегозапасов, фактических и восстановленных по спутниковой информации алгоритмом продукта GlobSnow (SWE) и моделью SPONSOR, для девяти реперных точек Восточно-Европейской равнины показал соответствие пространственных изменений расчётных характеристик зональной изменчивости. Восстановленные по спутниковой информации и рассчитанные моделью SPONSOR снегозапасы имеют высокую степень сходства для сезонного хода (коэффициент корреляции 0,8), при этом рассчитанные и фактические значения существенно различаются. Снегозапасы, восстановленные по спутниковым данным, повсеместно превышают фактические: на 34 % — в тундре, 24–29 % — в лесной зоне, 54–76 % — в степях. Снегозапасы, рассчитанные моделью SPONSOR, превышают фактические в пределах лесных территорий на 16–37 % и становятся ниже фактических на открытых пространствах лесостепей и степей на 5–21 %. Средняя квадратическая ошибка для многолетних рядов снегозапасов, рассчитанных моделью SPONSOR, больше средней квадратической ошибки значений, восстановленных по спутниковой информации на территории севернее 60° широты, — 53–63 и 32–48 мм соответственно; южнее картина меняется на обратную — 20–39 и 27–56 мм. Полученная закономерность может быть связана с уменьшением с севера

на юг дисперсии величин снегозапасов, рассчитанных моделью SPONSOR. Величина стандартного отклонения многолетнего хода снегозапасов, рассчитанных моделью SPONSOR, повсеместно больше стандартного отклонения как фактических, так и восстановленных по спутниковой информации значений (см. табл. 1) при снижении вариабельности с севера на юг. Это в целом соответствует снижению стандартного отклонения фактических значений снегозапасов от лесной зоны к лесостепной и степной.

Таблица 1. Многолетняя изменчивость снегозапасов по фактическим данным метеостанций, восстановленным значениям спутниковых наблюдений и модели SPONSOR (февраль – март 1979–2016 гг.) (курсивом выделены незначимые коэффициенты линейных трендов)

Номер точек*	Пункт	Значения фактические / продукт GlobSnow (SWE) / модель SPONSOR		
		Среднее, мм	Стандартное отклонение, мм	Коэффициент линейного тренда, мм/год
Тундра				
1	Ловозеро	90 / 121 / 150	21,7 / 23,1 / 32,9	<i>–0,099 / –0,226 / –0,556</i>
Тайга				
2	Калевала	102 / 71 / 140	24,5 / 30,9 / 39,1	<i>0,471 / –0,426 / –1,051</i>
3	Усть-Цильма	121 / 150 / 141	36,5 / 24,9 / 39,1	<i>–0,795 / –0,405 / –1,051</i>
4	Вытегра	80 / 131 / 101	34,0 / 40,1 / 39,1	<i>–1,072 / –2,669 / 0,6618</i>
5	Опарино	125 / 89 / 137	36,4 / 23,6 / 30,4	<i>–1,167 / –0,717 / 0,526</i>
Смешанные и широколиственные леса				
6	Сухиничи	42 / 74 / 45	23,3 / 23,1 / 34,2	<i>0,102 / –0,952 / 0,913</i>
Лесостепь и степь				
7	Порецкое	48 / 74 / 46	21,7 / 20,8 / 41,5	<i>0,661 / 0,306 / 1,286</i>
8	Калач	28 / 55 / 20	17,5 / 18,4 / 31,0	<i>–0,137 / –0,562 / 0,556</i>
9	Амбулак	52 / 41 / 58	22,5 / 21,2 / 25,0	<i>–0,387 / –0,270 / 0,311</i>

* Соответственно нумерации рис. 1.

Сравнение сезонных (суточных) значений фактических и восстановленных по модели и спутниковым данным снегозапасов показало высокую степень их сходства с коэффициентом корреляции около 0,8 (Турков, Сократов, 2016; Pulliainen, 2006). Такая оценка всё же не может служить показателем хорошего соответствия многолетней и межгодовой изменчивости расчётных и фактических значений снегозапасов. Как уже упоминалось, ошибки расчётных данных, приводимые разработчиками алгоритмов, составляют для продукта GlobSnow (SWE) 19–67 мм, в отдельных случаях достигая 60 мм (квадратическая ошибка), а для модели SPONSOR лежат в диапазоне от –15 до +15 % (относительная ошибка); рассчитаны они для тестовых периодов и тестовых точек Канады и Московской обл. соответственно (Турков, Сократов, 2016; Pulliainen, 2006). В табл. 2 приведены погрешности расчётов снегозапасов периода 1979–2016 гг. для исследуемых нами точек в виде средних квадратических (1) и относительных (2) ошибок для возможности сравнения с библиографическими первоисточниками описания алгоритмов. Кроме того, относительные ошибки более привычны и, возможно, более наглядны, но при расчёте квадратической ошибки лучше учитывается дисперсия массива. Относительная ошибка расчётных значений модели SPONSOR в целом чуть меньше относительных ошибок продукта GlobSnow (SWE), имея при этом отрицательные значения для точек в лесостепных и степных районах, что соответствует изменчивости абсолютных фактических и рассчитанных значений.

Рисунок 2 (см. с. 169) показывает ход фактических и восстановленных аномалий для максимальных (январь – февраль) снегозапасов. В качестве аномалий нами принимались значения, выходящие за уровень стандартного отклонения в положительной и отрицательной области распределения при удалённых для всех рядов трендах.

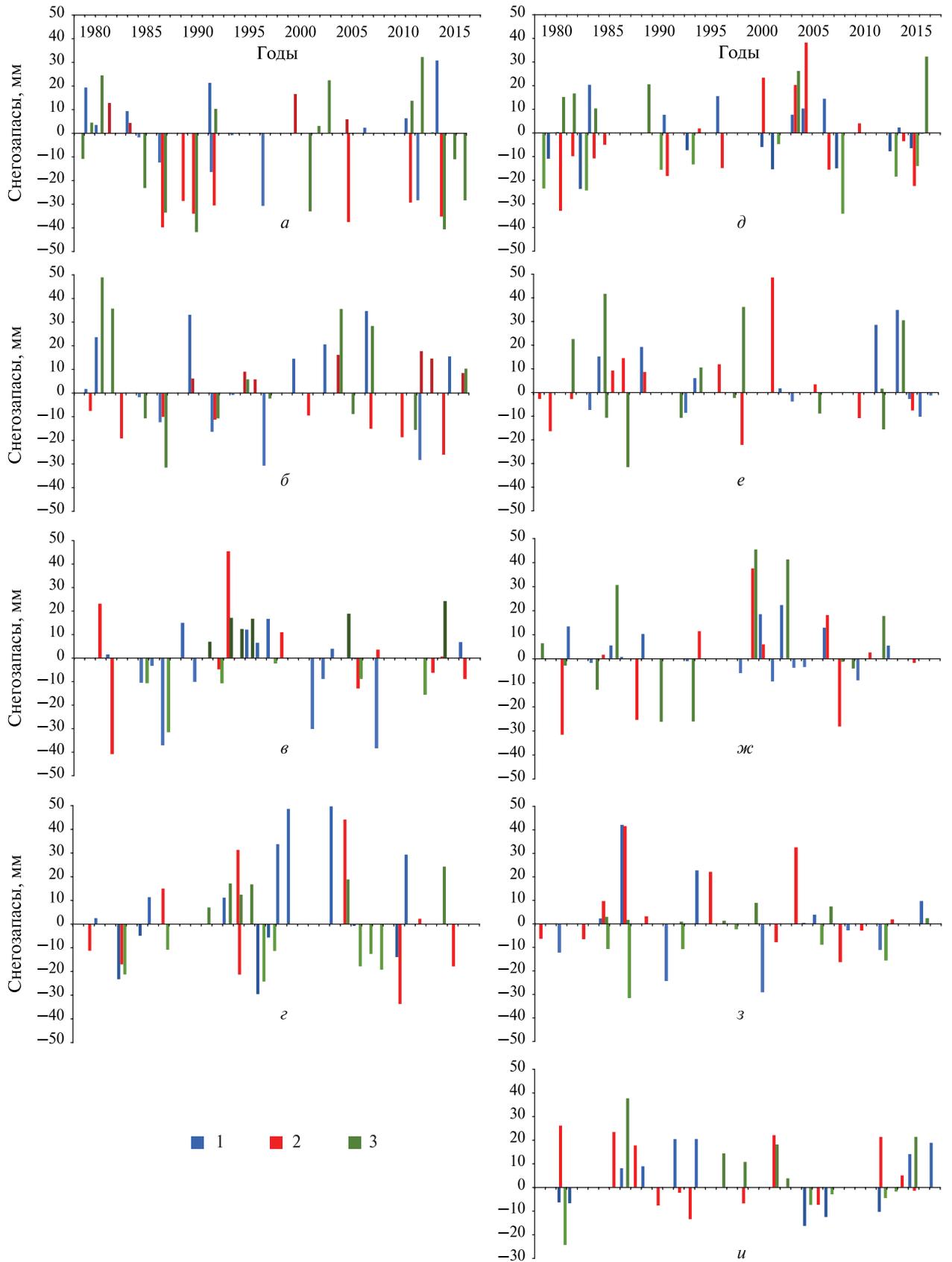


Рис. 2. Годы аномальных значений снегозапасов. Метеорологические станции: а — Ловозеро; б — Ка-левала; в — Усть-Цильма; г — Вытегра; д — Опарино; е — Сухиничи; ж — Порецкое; з — Калач; и — Амбулак. 1 — фактические данные (метеорологические станции), 2 — данные продукта ESA Glob-Snow, 3 — данные, рассчитанные моделью SPONSOR

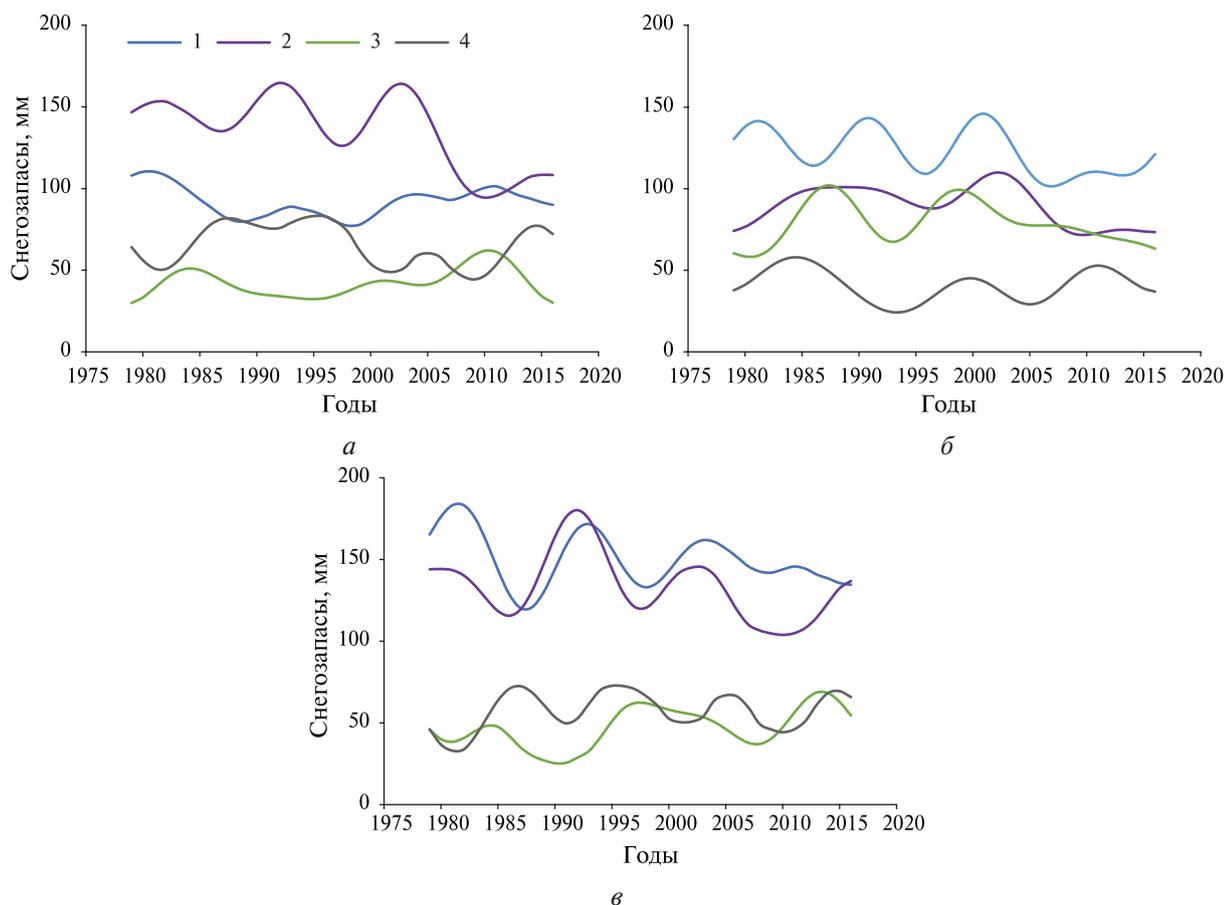


Рис. 3. Ряды Фурье: *а* — для фактических данных (метеорологические станции); *б* — для данных продукта ESA GlobSnow; *в* — для данных, рассчитанных моделью SPONSOR. 1 — Ловозеро, 2 — Вытегра, 3 — Сухиничи, 4 — Порецкое

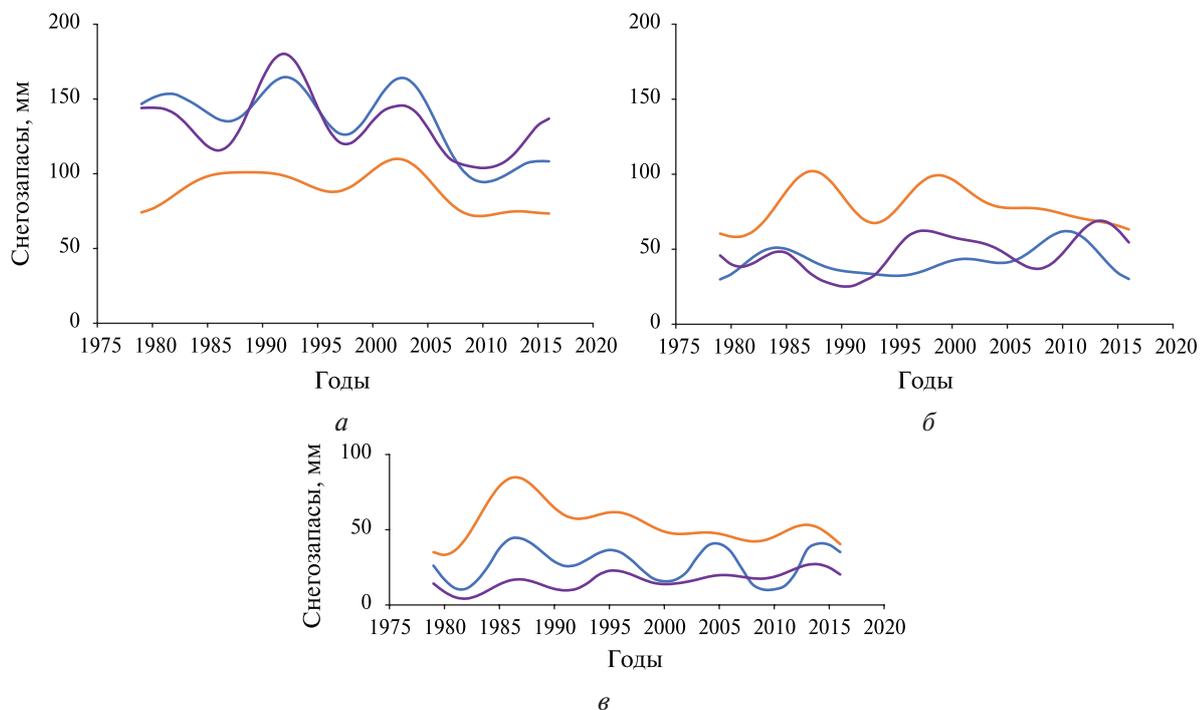


Рис. 4. Ряды Фурье для точек, расположенных в лесостепной и степной зонах: *а* — Порецкое; *б* — Калач; *в* — Амбулак. 1 — фактические данные (метеорологические станции), 2 — данные продукта ESA GlobSnow, 3 — данные, рассчитанные моделью SPONSOR

Таблица 2. Ошибки восстановленных снегозапасов (февраль – март 1979–2016 гг.)

Номер точек*	Пункт	Относительная ошибка, % / среднеквадратическая ошибка, мм	
		Продукт GlobSnow (SWE)	Модель SPONSOR
Тундра			
1	Ловозеро	34/32	66/63
Тайга			
2	Калевала	–30/49	37/53
3	Усть-Цильма	24/48	17/59
4	Вытегра	64/56	26/33
5	Опарино	–29/55	9/33
Смешанные и широколиственные леса			
6	Сухиничи	40/46	–7/30
Лесостепь и степь			
7	Порецкое	54/27	–4/44
8	Калач	96/32	–28/20
9	Амбулак	–28/41	–7/39

* Соответственно нумерации *рис. 1*.

Во всех случаях — как для положительных, так и отрицательных аномалий — в рассматриваемый период 1979–2016 гг. отмечается от четырёх до шести аномальных лет, т.е. 11–16 % от продолжительности ряда. Наблюдаемое отсутствие совпадений аномальных лет для разных станций вполне логично — в данном случае сказываются региональные различия снегонакопления. Вместе с тем совпадения аномалий фактических и расчётных данных как в отрицательной, так и положительной областях имеются лишь в двух-трёх случаях в течение расчётного периода.

Ещё одним показателем сходства межгодовых изменений фактических и расчётных данных может служить оценка квазипериодических колебаний рядов. Анализ проведён соответственно методу дискретного Фурье-преобразования — расчёту композитных временных рядов, содержащих сумму четырёх колебаний для временных рядов с удалённым трендом с общим охватом выборки более 90 %. В каждом случае композитные ряды формировались из первых четырёх гармоник. Полученные результаты представлены на *рис. 3* (см. с. 170). В целом сходство композитных рядов рассчитанных и фактических значений состоит в наличии четырёх (редко трёх) периодов, различия — в амплитуде максимумов и минимумов, а также в отсутствии чёткой синхронности. Анализ Фурье показал удовлетворительное сходство гармоник фактических снегозапасов с гармониками данных, рассчитанных моделью, по количеству периодов и совпадению их пиков во времени. Наибольшее сходство отмечается для степных и лесостепных территорий, корреляция рядов Фурье здесь достигает 0,8. Сходство гармоник Фурье фактических снегозапасов и снегозапасов, восстановленных по спутниковым данным, слабее и имеет заметное сходство лишь для открытых пространств со значимым коэффициентом корреляции 0,55 (*рис. 4*, см. с. 170).

Заключение

В целом пространственная изменчивость как снегозапасов, восстановленных по спутниковой информации алгоритмом продукта ESA GlobSnow (SWE), так и снегозапасов, рассчитанных моделью SPONSOR, соответствует зональной изменчивости фактических снегозапасов Восточно-Европейской равнины, имея тенденцию уменьшения с севера к югу. В большинстве случаев снегозапасы, восстановленные по спутниковым данным, превышают фактические. Снегозапасы, рассчитанные моделью SPONSOR, превышают фактические в пределах

лесных территорий и становятся ниже фактических на открытых пространствах — в лесостепях и степях. Средняя квадратическая ошибка для многолетних рядов значений, рассчитанных моделью SPONSOR, больше среднеквадратической ошибки данных, восстановленных по спутниковой информации, в соответствии с большей в этом случае дисперсией.

Модель SPONSOR лучше воспроизводит временной ход аномалий снегозапасов: для всех реперных точек их совпадение во времени с фактическими аномалиями происходит практически в половине случаев. Анализ Фурье показал удовлетворительное сходство гармоник фактических снегозапасов с гармониками данных, рассчитанных моделью, особенно для степных и лесостепных территорий: корреляция здесь достигает 0,8. Некоторое сходство гармоник Фурье фактических снегозапасов и снегозапасов, восстановленных по спутниковым данным, также отмечается для открытых пространств μ со значимым коэффициентом корреляции 0,55.

Разница в точности воспроизведения многолетней изменчивости снегозапасов моделью SPONSOR и алгоритмом продукта GlobSnow (SWE) может быть связана с особенностями входной информации, а именно лучшим качеством данных реанализа ERA-Interim. Процесс использования в продукте GlobSnow (SWE) в качестве входных параметров и верификатора в алгоритме расчёта интерполированных в узлы регулярной сетки данных наблюдений метеорологических станций требует, по мнению самих создателей продукта, существенной доработки ввиду недостаточного количества пунктов наблюдения, неравномерного их распределения по территории и разрывов в рядах наблюдений. Кроме того, исходные поправки алгоритма, связанные с влиянием леса на пассивное микроволновое излучение, рассчитывались для ограниченной территории — бореальной тайги Финляндии, что увеличивает погрешность расчётов для других территорий. В качестве источника входных метео данных модели SPONSOR используется информация реанализа ERA-Interim. Его преимущество состоит в полноте и однородности предоставляемых данных (включая солнечную и длинноволновую радиацию), глобальном охвате территории, в том числе областей с недостаточной регулярной сетью метеорологических станций. В последней версии реанализа улучшена система усвоения данных, применяется горизонтальное разрешение ($0,75 \times 0,75^\circ$), лучше формулируются ограничения фоновых ошибок, обновлён анализ влажности, улучшены физика модели и управление качеством данных. Отличия от предыдущих версий состоит также в изменении алгоритма проверки сумм осадков и схемы получения коротковолновой радиации и облачности.

Таким образом, следует предположить, что означенные свойства входной информации в совокупности со значительным количеством параметров и переменных, рассчитываемых моделью SPONSOR на каждой итерации расчётов (Турков, Сократов, 2016), и определяют меньшие погрешности в результатах в сравнении с алгоритмом продукта GlobSnow (SWE). Судя по публикациям, понимание разработчиками продукта GlobSnow (SWE) и модели SPONSOR причин погрешностей расчётов в целом и неопределённости в воспроизведении аномалий в частности позволяет снизить уровень расчётных ошибок в перспективе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 18-05-00440 и 18-05-00427 (сбор и обработка первичной информации), а также при поддержке темы № 0148-2019-0009 «Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России» Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук.

Литература

1. Бокучава Д. Д., Семенов В. А. Анализ аномалий приземной температуры воздуха в северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 1. С. 28–51.
2. Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Дендроклиматологические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.

3. *Киреева М. Б., Фролова Н. Л., Рец Е. П., Самсонов Т. Е.* Водный режим рек европейской территории России и его трансформация в XXI веке под влиянием меняющегося климата // Всероссийская научно-практ. конф. «Водные ресурсы России: современное состояние и управление»: сб. тр. 2018. С. 49–55.
4. *Кислов А. В., Китаев Л. М., Константинов И. С.* Статистическая структура крупномасштабных особенностей поля снежного покрова // Метеорология и гидрология. 2001. № 8. С. 98–104.
5. *Китаев Л. М.* Изменчивость снеготолщин северной Евразии в предвесенний и весенний периоды // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 2. С. 70–73.
6. *Кузьмин П. П.* Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 179 с.
7. *Николаев А. Н., Скачков Ю. Б.* Влияние снежного покрова и температурного режима мерзлотных почв на радиальный прирост деревьев Центральной Якутии // Журн. Сибирского федерального ун-та. Сер. «Биология». 2012. № 5. С. 43–51.
8. *Петрушина М. Н., Голубев В. Н.* Закономерности и особенности пространственно-временного распределения структуры снежного покрова в Северной Евразии (на примере 2004/05 гг.) // Геопространственные системы: структура, динамика, взаимосвязи: тр. 12-го съезда Русского географ. об-ва. Т. 2. СПб., 2005. С. 137–140.
9. *Попова В. В., Морозова П. А., Туткова Т. Б., Семенов В. А., Черенкова Е. А., Ширяева А. В., Китаев Л. М.* Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // Лёд и снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 73–86.
10. *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.
11. *Хан В. М., Рубинштейн К. Г., Шмакин А. Б.* Сравнение сезонной и межгодовой изменчивости снежного покрова в бассейнах рек России по данным наблюдений и реанализов // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 69–80.
12. *Шмакин А. Б., Турков Д. В., Михайлов А. Ю.* Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 69–79.
13. *Fierz Ch.* Field observation and modelling of weak-layer evolution // *Annals of Glaciology*. 1998. V. 26. P. 7–13.
14. *Kelly R. E., Chang A. T., Tsang L., Foster J. L.* A prototype AMSRE global snow area and snow depth algorithm // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2003. V. 41. P. 230–242.
15. *Koenig L. S., Forster R. R.* Evaluation of passive microwave snow water equivalent algorithms in the depth hoar-dominated snowpack of the Kuparuk River watershed, Alaska, USA // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 93. P. 511–527.
16. *Kruopis N., Praks J., Arslan A. N., Alasalmi H., Koskinen J., Hallikainen M.* Passive microwave measurements of snow-covered forest areas in EMAC'95 // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1999. V. 37. P. 2699–2705.
17. *Metsämäki S., Anttila S., Huttunen M., Vepsäläinen J.* A feasible method for fractional snow cover mapping in boreal zone based on a reflectance model // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 95(1). P. 77–95.
18. *Pulliainen J.* Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations // *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 101. P. 257–269.
19. *Pulliainen J., Hallikainen M.* Retrieval of regional snow water equivalent from space-borne passive microwave observations // *Remote Sensing of Environment*. 2001. V. 75. P. 76–85.
20. *Snow and Climate* / eds. R. L. Armstrong, E. Brun. Cambridge University Press, 2008. 222 p.
21. *Takala M., Pulliainen J., Sari J., Metsämäki O., Koskinen J. T.* Detection of Snowmelt Using Spaceborne Microwave Radiometer Data in Eurasia from 1979 to 2007 // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2009. V. 4. No. 9. P. 2996–3007.
22. *Uppala S. M., Kallberg P. W.* The ERA-40 re-analysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2005. V. 131. No. 612. P. 2961–3012.
23. *Vavrus S.* The role of terrestrial snow cover in the climate system // *Climate Dynamics*. 2007. V. 29. P. 73–88.

Accuracy of reproduction of interannual variability of snow storages of the East European Plain by satellite data illustrated by the example of the GlobSnow (SWE) product

L. M. Kitaev, T. B. Titkova, D. V. Turkov

Institute of geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: lkitaev@mail.ru

Peculiarities of reproducing the long-term variability of snow storages of the East European Plain by data recovered from satellite information were studied using the GlobSnow (SWE) product of the second version (European Space Agency) as an example. The variability of the recovered data is considered in comparison with the variability of the actual data of meteorological stations and the data calculated by the SPONSOR model (Institute of Geography RAS). The snow storages calculated according to the model and reconstructed from satellite information exceed the actual snow reserves, varying, however, in space according to the change of natural zones. The discrepancy regarding evidence remains high. Nevertheless, according to the developers, the tightness of the correlation between the calculated and actual data of the reference seasons and years is high, which, however, does not always ensure similar interannual variability of characteristics. The best coincidences of years with anomalous actual snow storages are noted for the characteristics calculated by the model, as well as in this case the similarity of the Fourier harmonics, especially for open spaces of forest-steppes and steppes.

Keywords: snow reserves, interannual and year variability, actual and model data, satellite information

Accepted: 10.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-164-175

References

1. Bokuchava D. D., Semenov V. A., Analiz anomalii prizemnoi temperatury vozdukha v severnom polusharii v techenie XX veka po dannym nablyudenii i reanalizov (Analysis of surface air temperature anomalies in the northern hemisphere during the 20th century based on observational and reanalysis data), *Fundamenta'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2018, No. 1, pp. 28–51.
2. Vaganov E. A., Shiyatov S. G., Mazepa V. S., *Dendroklimatologicheskie issledovaniya v Uralo-Sibirskoi Subarktike* (Dendroclimatological studies in the Ural-Siberian Subarctic), Novosibirsk: Nauka, 1996, 246 p.
3. Kireeva M. B., Frolova N. L., Rets E. P., Samsonov T. E., Vodnyi rezhim rek evropeiskoi territorii Rossii i ego transformatsiya v XXI veke pod vliyaniem menyayushchegosya klimata (The water regime of rivers in the European territory of Russia and its transformation in the XXI century under the influence of a changing climate), *Vodnye resursy Rossii: sovremennoe sostoyanie i upravlenie* (Water resources of Russia: current status and management), Proc. All-Russia Scientific and Practical Conf., 2018, pp. 49–55.
4. Kislov A. V., Kitaev L. M., Konstantinov I. S., Statisticheskaya struktura krupnomasshtabnykh osobennostei polya snezhnogo pokrova (Statistical structure of large-scale features of the snow cover field), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2001, No. 8, pp. 98–104.
5. Kitaev L. M., Izmenchivost' snegozapasov severnoi Evrazii v predvesennii i vesennii periody (Variability of snow reserves in northern Eurasia in the pre-spring and spring periods), *Kriosfera Zemli*, 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 70–73.
6. Kuzmin P. P., *Fizicheskie svoystva snezhnogo pokrova* (Physical properties of snow cover), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957, 179 p.
7. Nikolaev A. N., Skachkov Yu. B., Vliyanie snezhnogo pokrova i temperaturnogo rezhima merzlotnykh pochv na radial'nyi prirost derev'ev Tsentral'noi Yakutii (The influence of snow cover and temperature regime of permafrost soils on the radial growth of trees in Central Yakutia), *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser. Biologiya*, 2012, No. 5, pp. 43–51.
8. Petrushina M. N., Golubev V. N., Zakonomernosti i osobennosti prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya struktury snezhnogo pokrova v Severnoi Evrazii (na primere 2004/05 gg.) (Regularities and features of the spatial and temporal distribution of the snow cover structure in Northern Eurasia (for example, 2004/05)), *Geoprostranstvennye sistemy: struktura, dinamika, vzaimosvyazi: Trudy 12-go s'ezda Russkogo geograficheskogo obshchestva* (Geospatial systems: structure, dynamics, interconnections: Proc. 12th Congress of the Russian Geographical Society), Vol. 2, Saint Petersburg, 2005, pp. 137–140.

9. Popova V. V., Morozova P. A., Titkova T. B., Semenov V. A., Cherenkova E. A., Shiryaeva A. V., Kitaev L. M., Regional'nye osobennosti sovremennykh izmenenii zimnei akkumulyatsii snega na severe Evrazii po dannym nablyudenii, reanaliza i sputnikovykh izmerenii (Regional features of modern changes in winter snow accumulation in the north of Eurasia according to observations, reanalysis and satellite measurements), *Led i sneg*, 2015, Vol. 55, No. 4, pp. 73–86.
10. Turkov D. V., Sokratov V. S., Raschet kharakteristik snezhnogo pokrova ravninnykh territorii s ispol'zovaniem modeli lokal'nogo teplovлагообмена sponсор i dannyykh reanaliza na primere Moskovskoi oblasti (Calculation of snow cover characteristics of lowland territories using the local model of local heat and moisture exchange SPONSOR and reanalysis data on the example of the Moscow region), *Led i sneg*, 2016, Vol. 56, No. 3, pp. 369–380.
11. Khan V. M., Rubinshtein K. G., Shmakin A. B., Sravnenie sezonnoi i mezhgodovoi izmenchivosti snezhnogo pokrova v basseinakh rek Rossii po dannym nablyudenii i reanalizov (Snow cover model taking into account the layered structure and its seasonal evolution), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2007, Vol. 43, No. 1, pp. 69–80.
12. Shmakin A. B., Turkov D. V., Mikhailov A. Yu., Model' snezhnogo pokrova s uchetom sloistoi struktury i ee sezonnoi evolyutsii (Snow cover model taking into account the layered structure and its seasonal evolution), *Kriosfera Zemli*, 2009, Vol. 13, No. 4, pp. 69–79.
13. Fierz Ch., Field observation and modelling of weak-layer evolution, *Annals of Glaciology*, 1998, Vol. 26, pp. 7–13.
14. Kelly R. E., Chang A. T., Tsang L., Foster J. L., A prototype AMSRE global snow area and snow depth algorithm, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, pp. 230–242.
15. Koenig L. S., Forster R. R., Evaluation of passive microwave snow water equivalent algorithms in the depth hoar-dominated snowpack of the Kuparuk River watershed, Alaska, USA, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 93, pp. 511–527.
16. Kruopis N., Praks J., Arslan A. N., Alasalmi H., Koskinen J., Hallikainen M., Passive microwave measurements of snow-covered forest areas in EMAC'95, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1999, Vol. 37, pp. 2699–2705.
17. Metsämäki S., Anttila S., Huttunen M., Vepsäläinen J., A feasible method for fractional snow cover mapping in boreal zone based on a reflectance model, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 95, No. 1, pp. 77–95.
18. Pulliainen J., Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 101, pp. 257–269.
19. Pulliainen J., Hallikainen M., Retrieval of regional snow water equivalent from space-borne passive microwave observations, *Remote Sensing of Environment*, 2001, Vol. 75, pp. 76–85.
20. *Snow and Climate*, R. L. Armstrong, E. Brun (eds.), Cambridge University Press, 2008, 222 p.
21. Takala M., Pulliainen J., Sari J., Metsämäki O., Koskinen J. T., Detection of Snowmelt Using Spaceborne Microwave Radiometer Data in Eurasia from 1979 to 2007, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 4, No. 9, pp. 299–3007.
22. Uppala S. M., Kallberg P. W., The ERA-40 re-analysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2005, Vol. 131, No. 612, pp. 2961–3012.
23. Vavrus S., The role of terrestrial snow cover in the climate system, *Climate Dynamics*, 2007, Vol. 29, pp. 73–88.