Зональные особенности изменений снегозапасов Восточно-Европейской равнины (по данным спутниковых наблюдений)

Л. М. Китаев, Т. Б. Титкова

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

Для двух последних десятилетий уточнены особенности зональной изменчивости снегозапасов Восточно-Европейской равнины. Осреднённые по зонам, они снижаются от тундры, лесотундры и тайги к зоне степей на фоне зонального повышения приземной температуры воздуха и осадков, максимальных в зоне лесов. Ошибка зональных, восстановленных по спутниковым данным снегозапасов относительно фактических составляет 14-29 % с максимумом ошибки в лесостепной и степной зонах. Вариабельность многолетних рядов восстановленных снегозапасов повсеместно превышает вариабельности их фактических значений. Коэффициент корреляции многолетнего хода восстановленных и фактических снегозапасов максимален в зоне лесов (0,63–0,69). Многолетние тенденции на всей исследуемой территории отрицательны и незначимы; снижение согласно линии тренда за период 2000–2019 гг. восстановленных снегозапасов происходит быстрее в сравнении со снижением фактических. Распределение характеристик изменчивости восстановленных и фактических снегозапасов по площади схожи. Вклад приземной температуры воздуха в многолетнюю изменчивость как фактических, так и восстановленных снегозапасов превышает вклад осадков. Рассмотренная гипотеза о возможности использований значений NDVI для оценки вклада растительности в зональные различия снегозапасов признана маловероятной ввиду неоднозначности статистических зависимостей. В результате при разнице абсолютных значений восстановленные по спутниковым данным снегозапасы и снегозапасы, наблюдаемые на метеорологических станциях, имеют сходство зональной многолетней изменчивости и пространственного распределения.

Ключевые слова: восстановленные и фактические снегозапасы, приземная температура воздуха, осадки, NDVI, зональная изменчивость, многолетние тенденции, межгодовая изменчивость, регрессионный анализ

Одобрена к печати: 22.09.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-167-178

Введение

Особенности пространственно-временной изменчивости снежного покрова в средних и высоких широтах Северного полушария во многом отражают характер взаимодействия атмосферных процессов и процессов, происходящих на поверхности суши. Изменения снегозапасов вследствие колебаний характеристик климата приводят к изменениям водного баланса, водно-физических свойств почвы и растительности. В свою очередь, неоднородность залегания снежного покрова в связи с особенностями ландшафтов влияет на метеорологический режим через региональный тепловой баланс. И как результат, состояние снежного покрова можно считать одним из ключевых природных факторов, влияющих на эффективность хозяйственного использования природных ресурсов. В данном случае постоянное усовершенствование методов дистанционного зондирования поверхности приобретает исключительную важность, особенно для регионов с высокой степенью хозяйственного освоения, в том числе для Восточно-Европейской равнины. Так, например, современный спутниковый микроволновый радиометр AMSR-E (англ. Advanced Microwave Scanning Radiometer) на борту американского космического аппарата Aqua — составной части комплексной программы EOS (англ. Earth Observing System) позволяет проводить сканирование поверхности с пространственным и временным разрешением, достаточным для оперативной и долгосрочной оценки состояния экосистем. Вместе с тем пространственная неоднородность и временная трансформация снежной толщи, обусловленные различиями ландшафтных условий и метеорологических

явлений, может рассматриваться как одна из основных причин несогласованности реальных и восстановленных по спутниковым данным снегозапасов (Fierz, 1998; Koenig, Forster, 2004 и др.).

Цель проведённых нами исследований состоит в уточнении зональных различий распределения снежного покрова последних десятилетий с оценкой в том числе репрезентативности использования спутниковых данных на примере Восточно-Европейской равнины.

Методология и исходные данные

Распределение снегозапасов по территории зависит в значительной мере от климатических факторов (осадки, приземная температура воздуха, ветровой режим) и от характера растительности. Результаты работ В. М. Мишона (2007) показывают превышение снегозапасов лесных массивов над снегозапасами открытых пространств в 1,4 раза — на основании анализа данных наблюдений Нижнедевицкой и Волховской водно-балансовых станций (лесостепная зона Воронежской обл.). Подобное соотношение получено нами в результате проведения полевых работ в аналогичных условиях лесостепи Курской обл. (Китаев, 1998).

В качестве основной причины различий выделяются ветро-метелевая сублимация снега и испарение с его поверхности на открытых пространствах (Котляков, 1984). Так, по данным В.И. Панова (2016), в степной зоне Восточно-Европейской равнины потери снегозапасов достигают 20–25 % от их общей величины; по данным В.М. Котлякова (1984), потери могут составлять до 30 мм — 25 % общей величины. Кроме того, высказываются предположения об увеличении турбулентности воздушных потоков над лесными массивами за счёт их «шеро-ховатости», что приводит здесь к повышению интенсивности выпадения осадков и, как следствие, к увеличению снегозапасов (Мишон, 2007). Также имеются признаки усиленного снегонакопления на границе открытых пространств и лесных массивов, связанного, по-видимому, с повышенной здесь аккумуляцией переносимого метелями снега (Китаев и др., 2005).

Процесс накопления снега в лесу, наряду с зависимостью от метеорологических условий, — сложная функция климата, рельефа и таксационных характеристик лесных массивов. Соответствующие закономерности распределения снежного покрова в зоне лесов на сегодня исследованы недостаточно. Так, в частности, на метеорологических станциях при проведении режимных маршрутных снегомерных съёмок в лесу особенности древостоя не фиксируются. В результате неоднородность залегания снежного покрова может анализироваться лишь в сравнении данных наблюдений на открытых и лесных маршрутах конкретных метеорологических станций или же сравнением данных лесных снегомерных наблюдений, проводимых в разных природно-климатических зонах с заведомо различным составом лесной растительности, что не позволяет снизить неопределённость в оценках региональных снегозапасов. Наши исследования в подзоне смешанных лесов (Приокско-Террасный заповедник, юг Московской обл. и Центрально-Лесной заповедник, север Тверской обл.) позволили оценить различия в снегонакоплении уже для лесных участков с разным породным составом: среднемноголетние снегозапасы лесных массивов с преобладанием лиственных пород превышают здесь снегозапасы открытых участков и лесных массивов с преобладанием хвойных пород в 1,25–1,4 раза (Китаев и др., 2015) при заметных различиях стандартного отклонения и трендов многолетних рядов. Основные причины такого распределения снега связаны с испарением с поверхности снега на открытых пространствах и с перехватом части твёрдых осадков кронами хвойных деревьев.

Означенные особенности залегания снежного покрова не могут не влиять на точность региональных (зональных) оценок снегозапасов, в том числе с использованием спутниковых данных. В данном случае региональные особенности воспроизведения снегозапасов рассмотрены нами на примере продукта GlobSnow(SWE) второй версии, разработанного в рамках исследований Европейского космического агентства (*англ*. European Space Agency — ESA). Механизм расчёта значений водного эквивалента снега (далее — восстановленные снегозапасы) основан на использовании полуэмпирической модели HUT (*англ*. Helsinki Technological

university — Хельсинкский технологический университет) с использованием данных частотных каналов спутниковых радиометров 19 и 37 ГГц с суточным шагом по времени и пространственным разрешением сетки моделирования климата СМG (*англ.* climate modelling grid) $0,05 \times 0,05^{\circ}$ — начиная с 1979 г. по настоящее время. В алгоритм расчёта встроены блоки, оценивающие теплообмен снежной толщи с подстилающей поверхностью и атмосферой и описывающие особенности снежной толщи после начала снеготаяния, при этом производится оптимизация расчётов на основе байесовского подхода с учётом интерполируемых в соответствующую сетку фактических данных (толщина, плотность и влажность снега, размер зерна, приземная температура воздуха) (Pulliainen, 2006).

Влияние леса на модельный расчёт снегозапасов учитывается встроенным алгоритмом SCAmod (*англ*. Finland Environment Institute — Институт окружающей среды, Финляндия) с помощью эмпирической модели отражательной способности снежного покрова, где в качестве параметров используются значения коэффициента отражения снега, леса и свободной от снега поверхности. Получаемые в результате коэффициенты проницаемости лесных массивов корректируют в модели HUT расчёт снегозапасов в лесных массивах (Kruopis et al., 1999; Metsämäki et al., 1995). Авторы модели указывают на некоторое завышение в процессе расчётов величины коэффициента проницаемости. И кроме того, коэффициенты отражательной способности снега разрабатывались и тестировались на примере бореальных лесов на территории Финляндии, что также обуславливает потенциальную возможность ошибок при исследовании других территорий.

По сведениям разработчиков продукта GlobSnow(SWE), ошибка модельных расчётов снегозапасов может достигать тем не менее 35 % по отношению к данным наземных наблюдений — при максимальных погрешностях на юго-западе региона в связи, по-видимому, с повышенной здесь влажностью снега. Вместе с тем разработчиками указано, что в лесной зоне разница в значениях восстановленных и фактических снегозапасов в отдельных случаях может достигать 60 мм. Повысить точность расчётов в должной степени авторам алгоритма не удалось ввиду сложности в оценке величины зёрен, наличия в снежной толще ледяных корок, значительной глубины снега, отражательной способности снежного покрова в лесных массивах (Pulliainen, 2006).

Для уточнения качества воспроизведения спутниковыми данными зональных оценок было проведено сравнение многолетних рядов восстановленных снегозапасов (продукт GlobSnow(SWE)) с фактическими данными двухсот метеорологических станций Восточно-Европейской равнины (www.meteo.ru). Рассматривались снегозапасы февраля как практически повсеместно месяца с наибольшей снежностью. Расчётные данные соответствующих ячеек модели были привязаны к месту расположения метеорологических станций с последующей оценкой зональных особенностей распределения. В соответствии с районированием А. Г. Исаченко и А. А. Шляпникова (1989) нами рассматриваются зоны тундры и лесотундры (объединены), в зоне лесов — подзоны тайги, смешанных и широколиственных лесов, лесостепная и степная зоны.

В большинстве случаев прослеживается значимая связь изменчивости климата и растительного покрова, в связи с чем предполагается возможным использование характеристик растительности как индикатора климатических изменений (Титкова, Виноградова, 2015; Цепелев и др., 2015; Krankina et al., 2010 и др.). Попытка количественно оценить значимость растительного покрова для анализа изменчивости фактических и восстановленных снегозапасов проведена нами с использованием индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс). Индекс успешно используется в течение двух последних десятилетий для глобального мониторинга состояния растительного покрова. Значения NDVI характеризуют плотность растительности в определённой точке — разницей значений интенсивности отражённого излучения в красном и инфракрасном диапазонах, делённой на сумму значений их интенсивности. Высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведёт к меньшему отражению в красной области спектра и большему — в инфракрасной. В результате соотношение этих показателей позволяет анализировать состояние растительных сообществ. Нами использован продукт MODIS MODI3C2 версии 6, где значения NDVI рассчитываются моделью MOD13A2 по данным радиометра NOAA-AVHRR (разработчик — Национальное управление океанических и атмосферных исследований США, *англ*. National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced). Даная версия продукта адаптирована для исследований растительного покрова в высоких и средних широтах. Архив данных, открытый в 2000 г., содержит безоблачные пространственные композитные изображения месячных данных, осреднённых по исходным суточным измерениям с пространственным разрешением CMG $0,05 \times 0,05^{\circ}$ (Beck et al., 2006). Значения индекса также привязаны в соответствующих ячейках к местоположению метеорологических станций, данные которых используются для анализа распределения снежного покрова. При этом рассматриваются индексы, осреднённые за июль, и в данном случае выдвигается гипотеза о возможности выявления, таким образом, признаков влияния растительного покрова на особенности снегонакопления в последующий зимний период для уточнения оценок зональных особенностей формирования снегозапасов.

Используемые в анализе фактические данные о снегозапасах представляют собой результат проводимых метеорологическими станциями маршрутных измерений (www.meteo. ru) с осреднением за февраль как наиболее снежный месяц на большей части Восточно-Европейской равнины. Для иллюстрации климатической обстановки рассматриваются наблюдаемые на метеорологических станциях средние и суммарные значения приземной температуры воздуха и осадков за декабрь – февраль. Расположение этих станций не всегда соответствует расположению станций, имеющих информацию по снежному покрову, ввиду различий программ наблюдений станций, что тем не менее не становится препятствием для выявления зональных различий характеристик. Исследуемый период с 2000 по 2019 г. обусловлен обновлением в 2000 г. технологии расчётов значений NDVI.

Особенности зонального распределения снегозапасов

Климатические условия изменчивости снегозапасов Восточно-Европейской равнины в период 2000–2019 гг. могут быть проиллюстрированы средними по природным зонам данными, приведёнными в *табл. 1.* Средняя за период с декабря по февраль приземная температура воздуха плавно снижается от -10 °C в тундре и лесотундре до -7 °C в степной зоне, мало различаясь вариабельностью многолетнего хода: стандартное отклонение меняется от 2,2 до 2,6 °C при максимальной неоднородности многолетних рядов в зонах тайги и смешанных лесов. Тенденции многолетних изменений повсеместно положительны, но незначимы, за исключением тундры и лесотундры (коэффициент линейного тренда — 0,074 °C/год). Максимальная вариабельность многолетнего хода приземной температуры воздуха характерна для таёжной зоны, наиболее заметные положительные многолетние тенденции — для северо-запада территории, отрицательные — для юго-востока (*puc. 1*, см. с. 171).

Средние зональные осадки изменяются от 91 до 129 мм при наибольших осадках в залесенных регионах с максимумом в подзоне смешанных лесов — 129 мм. Коэффициенты линейных трендов здесь также положительны и незначимы. При этом прирост осадков за период 2000—2019 гг. соответственно линии тренда составляет 2—5 мм за расчётный период при максимальном приросте в зоне тайги в 11 мм. Распределение значений стандартного отклонения по территории достаточно равномерно при некотором увеличении в лесостепной и степной зонах. Заметные положительные тенденции многолетнего хода характерны для северо-запада территории, наименее значимые отмечаются в лесостепной и степной зонах (см. *табл. 1, рис. 2,* см. с. 173).

Значения NDVI июля закономерно велики в регионах с лесной растительностью, имея максимальную величину 0,153 в районах с таёжной растительностью. Вариабельность многолетних зональных индексов различается мало при значениях стандартного отклонения 0,021–0,027 с максимумом 0,032 в зоне лиственных лесов. Значимые положительные тенденции многолетнего хода индексов имеют территории с лесной растительностью со значениями 0,002–0,004 в год (см. *табл. 1, рис. 2*).



Рис. 1. Пространственная изменчивость приземной температуры воздуха и осадков: соответственно *а* и *г* — среднемноголетняя; *б* и *д* — стандартное отклонение; *в* и *е* — линейный тренд. Цвета фона: 1 тундра; 2 — лесотундра; 3 — тайга; 4 — смешанные и широколиственные леса; 5 — лесостепь; 6 — степь

Характеристика	Территория	Среднее многолетнее	Стандартное отклонение	Коэффициент ли- нейного тренда*
Запасы воды в снежном покрове в феврале, мм (фактический/ восстановленный)	Тундра и лесотундра	101/93	15,69/17,54	-0,595/-0,868
	Тайга	112/91	15,04/25,78	-0,131/-0,68
	Смешанные леса	89/76	15,53/22,36	-0,063/-0,35
	Лиственные леса	87/75	17,42/23,99	-0,188/-0,971
	Лесостепь	77/55	16,17/21,06	0,335/-0,865
	Степь	66/51	13,74/14,83	0,199/-0,695

Таблица 1. Региональные особенности снежного покрова, температуры воздуха, осадков и свойств растительности

Окончание	табл.	1
-----------	-------	---

Характеристика	Территория	Среднее многолетнее	Стандартное отклонение	Коэффициент ли- нейного тренда*
Приземная температура воздуха, среднее за декабрь – февраль, °С	Тундра и лесотундра	-10,5	2,26	0,074
	Тайга	-9,8	2,61	0,072
	Смешанные леса	-8,3	2,47	0,025
	Лиственные леса	-7,9	2,23	0,015
	Лесостепь	-7,8	2,14	0,029
	Степь	-7,0	2,12	0,039
Осадки, сумма за декабрь – фев- раль, мм	Тундра и лесотундра	91	11,02	0,262
	Тайга	120	17,09	0,594
	Смешанные леса	129	15,01	0,242
	Лиственные леса	124	22,45	0,239
	Лесостепь	119	24,60	0,135
	Степь	103	19,29	0,104
Значения NDVI	Тундра и лесотундра	0,085	0,026	0,001
	Тайга	0,15	0,027	0,002
	Смешанные леса	0,105	0,032	0,004
	Лиственные леса	0,107	0,031	0,003
	Лесостепь	0,104	0,030	-0,001/-0,001
	Степь	0,096	0,024	-0,001/-0,002

Примечание: * Линейные тренды рассчитаны в формате величина/год; курсивом выделены незначимые на уровне 95 % коэффициенты.

Раннее нами была проведена оценка качества воспроизведения многолетней и межгодовой изменчивости снегозапасов продуктом GlobSnow(SWE) сравнением данных спутника с результатами расчётов модели SPONSOR (Институт географии Российской академии наук) и данными наблюдений девяти реперных метеорологических станций, расположенных в основных природных зонах Восточно-Европейской равнины. Выявленные погрешности восстановленных данных относительно фактических лежат в диапазоне 20–30 % в лесотундре, для точек в тайге, в зоне смешанных лесов и в степи; погрешность более 50 % отмечена в лесостепи. Проведённый анализ также показал существенные различия стандартного отклонения и величины многолетних трендов восстановленных и фактических снегозапасов.

Средние по природным зонам величины снегозапасов закономерно снижаются с севера к югу, будучи максимальными в тундре, лесотундре и тайге — 110—112 мм. Ошибка зонального осреднения спутниковых данных составляет 14—17 % для тундры и лесотундры, тайги, смешанных и широколиственных лесов; в лесостепной и степной зонах ошибка увеличивается до 22–29 %.

Многолетняя вариабельность восстановленных снегозапасов повсеместно превышает вариабельности их фактических значений — 1,61—1,37 раза для значений стандартного отклонения (14,8—23,8/13,7—17,4 мм). Многолетние тенденции повсеместно отрицательны и незначимы, снижение зональных снегозапасов за период 2000—2019 гг. согласно линии трендов составляет от 3 до 7 мм для фактических данных и 6—16 мм для восстановленных значений. Характер распределения восстановленных и фактических снегозапасов по площади близок с учётом разницы абсолютных значений. Величина стандартного отклонения фактических данных имеет более однородное распределение по площади; восстановленные снегозапасы, в отличие от фактических, практически по всей территории имеют заметную скорость многолетнего снижения (см. *табл. 1, рис. 3*, см. с. 174).



Рис. 2. Пространственная изменчивость значений NDVI: *а* — среднемноголетние; *б* — стандартное отклонение; *в* — линейный тренд. Цвета фона — см. подпись к *рис. 1*

Многолетняя изменчивость снегозапасов

Как уже упоминалось, для всех природных зон Восточно-Европейской равнины свойственны незначимые отрицательные линейные тренды снегозапасов, за исключением севера региона, снижение за период 2000–2019 гг. согласно линии тренда составляет 3–7 и 6–16 мм соответственно для фактических и восстановленных снегозапасов. Согласно задачам исследований проведена оценка различий многолетней динамики зональных восстановленных и фактических снегозапасов на фоне изменений приземной температуры воздуха и осадков, а также в связи с возможным влиянием изменчивости растительного покрова по данным NDVI.



Рис. 3. Пространственная изменчивость фактических и восстановленных снегозапасов: соответственно *а* и *г* − среднемноголетние; *б* и *д* − стандартное отклонение; *в* и *е* − линейный тренд. Цвета фона − см. подписи к *рис. 1*

Вариабельность многолетних рядов восстановленных снегозапасов повсеместно выше вариабельности фактических. Вместе с тем во всех случаях максимальные значения стандартного отклонения снегозапасов характерны для зоны лесов, где также максимальна вариабельность значений NDVI. Корреляционная связь многолетнего хода восстановленных и фактических снегозапасов невелика, будучи максимальной в лесной зоне: коэффициенты корреляции составляют 0,548 в тундре и лесотундре, 0,664 — в тайге, 0,689 и 0,629 — в смешанных и лиственных лесах, 0,560 и 0,363 — в лесостепной и степной зонах.

Вклад в изменчивость снегозапасов метеорологических характеристик и значений NDVI исследован с применением регрессионного анализа (*табл. 2*). Общий коэффициент регрессии имеет близкие значения для фактических и восстановленных снегозапасов — в диапазоне 0,60–0,78. Соответственно величинам бета-коэффициентов изменчивость как восстановленных, так и фактических снегозапасов повсеместно в большей мере связана с ходом приземной температуры воздуха (обратная зависимость), нежели с ходом осадков (прямая зависимость).

Вклад значений NDVI в ход фактических снегозапасов повсеместно незначим, тогда как вклад в изменчивость восстановленных снегозапасов существенно превышает вклад метеорологических — с обратным знаком.

Территория	Параметры регрессионной зависимости снегозапасов, фактические данные/восстановленные данные				
	Коэффициент регрессии	Бета коэффициенты			
		Приземная температура воздуха	Осадки	NDVI	
Тундра и лесотундра	0,611/0,665	-0,330/-0,401	0,378/0,299	-0,234/-0,724	
Тайга	0,665/0,492	-0,550/-0,118	<i>-0,138/</i> -0,321	-1,222/-3,767	
Смешанные леса	0,592/0,748	-0,406/-0,400	0,385/-0,099	-0,080/-0,538	
Лиственные леса	-0,762/-0,782	-0,445/-0,589	-0,652/0,145	-0,910/-5,821	
Лесостепь	0,600/0,745	-0,511/-0,537	0,456/-0,051	<i>-1,134/-</i> 1,781	
Степь	-0,264/0,540	-0,090/-0,378	-0,262/-0,065	-0,181/-0,451	

Таблица 2. Зональная регрессионная зависимость многолетнего хода фактических и восстановленных снегозапасов от многолетнего хода приземной температуры воздуха, осадков и значений NDVI

Примечание: Курсивом выделены незначимые коэффициенты.

Заключение

Уточнены особенности зональной изменчивости снегозапасов для двух последних десятилетий. Осреднённые по зонам, они снижаются от тундры, лесотундры и тайги к зоне степей на фоне зонального повышения приземной температуры воздуха и осадков, максимальных в зоне лесов. Ошибка зональных восстановленных снегозапасов относительно фактических составляет 14-17 % для тундры, лесотундры и зоны лесов с увеличением ошибки до 22–29 % в лесостепной и степной зонах, что может быть связано с наличием в условиях тёплых зим на юге региона повышенной влажности и ледяных включений в снежной толще. Вариабельность многолетних рядов восстановленных снегозапасов повсеместно превышает вариабельности их фактических значений в 1,61–1,37 раза при максимумах стандартного отклонения в зоне лесов; коэффициент корреляции составляет 0,60–0,78. Многолетние тенденции повсеместно отрицательны и незначимы; снижение согласно линии тренда за период 2000–2019 гг. восстановленных снегозапасов происходит быстрее в сравнении со снижением фактических снегозапасов: соответственно 6–16 и 3–7 мм. Распределение восстановленных и фактических снегозапасов по площади схожи; величина стандартного отклонения фактических снегозапасов имеет более равномерное распределение по территории; восстановленные снегозапасы, в отличие от фактических, практически по всей территории имеют заметную скорость многолетнего снижения.

Многолетнее снижение фактических снегозапасов идёт медленнее относительно многолетнего снижения восстановленных снегозапасов — можно предположить, что это оказывается следствием большей вариабельности многолетнего ряда восстановленных снегозапасов в связи, по-видимому, с определёнными недостатками модельного алгоритма.

Соответственно проведённому регрессионному анализу, вклад приземной температуры воздуха в многолетнюю изменчивость превышает вклад осадков — как для фактических, так и для восстановленных снегозапасов. Вклад значений NDVI значим только для многолетних изменений восстановленных снегозапасов (с обратным знаком), превышая вклад метеорологических характеристик. Гипотетически можно было бы предположить, что при увеличении растительной биомассы происходит увеличение перехвата твёрдых осадков кронами древесной растительности с последующим испарением — при снижении, соответственно,

снегонакопления на поверхности земли. Такая версия тем не менее маловероятна, поскольку вклад изменчивости значений NDVI в изменчивость восстановленных снегозапасов велик не только в зоне лесов, но и на открытых территориях и незначим вовсе для хода фактических снегозапасов. Более вероятным может быть предположение о необходимости корректировки в модельных расчётах учёта отражательных свойств снега — и прежде всего, в связи с особенностями растительного покрова.

Таким образом, при разнице абсолютных значений восстановленные по спутниковым данным снегозапасы и снегозапасы, наблюдаемые на метеорологических станциях, имеют сходство зональной многолетней изменчивости и пространственного распределения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 18-05-00440, 18-05-00427, 20-55-00007 (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. Исаченко А. Г., Шляпников А.А. Ландшафты. М.: Мысль, 1989. 605 с.
- 2. *Китаев Л. М.* Статистический анализ распределения характеристик снежного покрова Курской модельной области // Материалы метеоролог. исслед. 1998. № 16. С. 65–72.
- 3. *Китаев Л. М., Крюгер О., Шерстюков Б. Г., Хобе Х.* Признаки влияния растительности на распределение снежного покрова // Метеорология и гидрология. 2005. № 7. С. 61–69.
- 4. *Китаев Л. М., Аблеева В.А., Асаинова Ж.А.* Влияние лесной растительности на тенденции локальной изменчивости снегозапасов // Тр. Приокско-Террасного заповедника. Вып. 6. Тула: Изд-во Аквариус, 2015. С. 67–77.
- 5. Котляков В. М. Гляциологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 526 с.
- 6. *Мишон В. М.* Теоретические и методические основы оценки ресурсов поверхностных вод в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения Европейской части России: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2007. 242 с.
- 7. *Панов В. И*. Потери снега на ветро-метельную сублимацию и снос в открытых и лесомелиорированных агроландшафтах степной зоны // Научно-агроном. журн. 2016. № 2(99). С. 10–12.
- 8. *Титкова Т.Б., Виноградова В.В.* Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
- 9. *Цепелев В. Ю., Паниди Е. А., Торлопова Н. В., Бобков А. А.* Использование характеристик растительного покрова таежной зоны для мониторинга климатических изменений XXI в. // Ученые записки российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2015. Вып. 40. С. 221–235.
- Beck P.S. Atzberger C., Høgda K.A., Bernt Johansen B. Skidmore Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 100. P. 321–334.
- 11. *Fierz Ch.* Field observation and modelling of weak-layer evolution // Annals of Glaciology. 1998. V. 26. P. 7–13.
- 12. *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.
- 13. *Krankina O. N., Pflugmacher D., Hayes D. J., McGuire A. D., Hansen M. C., Hame T., Elsakov V., Nelson P.* Vegetation Cover in the Eurasian Arctic: distribution, monitoring, and role in carbon cycling // Eurasian arctic land cover and land use in a changing climate. Springer Intern. Publishing, 2010. P. 79–108.
- 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.
- 15. *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. 1995. V. 95(1). P. 77–95.
- 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. V. 101. P. 257–269.

Zonal features of changes in snow storage of East European Plain (according to satellite observations)

L. M. Kitaev, T. B. Titkova

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

The features of zonal variability of snow storages of the East European Plain have been specified for the last two decades. Averaged over the zones, they decrease from the tundra, forest-tundra and taiga to the steppe zone against the background of a zonal increase in air temperature and precipitation with maximum in the forest zone. The error of zonal snow storages recovered from satellite data relative to the factual storages is 14-29 % with the maximum error in the forest-steppe and steppe zones. The variability of the long-term series of the recovered snow reserves everywhere exceeds the variability of their factual values. The correlation coefficient of the long-term course of the restored and factual snow reserves is maximal in forest zone (0.63-0.69). Long-term trends are everywhere negative and insignificant; decrease according to the trend line for the period 2000–2019 to restored snow storages is faster in comparison with decrease in factual snow storages. Spatial distribution of the recovered and factual snow storages variability characteristics is similar. The contribution of air temperature to the long-term variability of both recovered and factual snow storages exceeds the contribution of precipitation. The considered hypothesis about the possibility of using NDVI values to assess the contribution of vegetation to zonal differences in snow storages is recognized as unlikely, due to the ambiguity of statistical dependencies. As a result, when the absolute values are different, the snow storages recovered from satellite data and snow storages observed at meteorological stations have the similarity of longterm zonal variability and spatial distribution.

Keywords: restored and actual snow reserves, surface air temperature, precipitation, NDVI, zonal variability, long-term trends, interannual variability, regression analysis

Accepted: 22.09.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-167-178

References

- 1. Isachenko A. G., Shlyapnikov A. A., *Landshafty* (Landscapes), Moscow: Mysl', 1989, 605 p.
- 2. Kitaev L. M., Statisticheskii analiz raspredeleniya kharakteristik snezhnogo pokrova Kurskoi model'noi oblasti (Statistical analysis of the distribution of snow cover characteristics in the Kursk model region), *Materialy meteorologicheskikh issledovanii*, 1998, No. 16, pp. 65–72.
- 3. Kitaev L. M., Kryuger O., Sherstyukov B. G., Khobe Kh., Priznaki vliyaniya rastitel'nosti na raspredelenie snezhnogo pokrova (Signs of the influence of vegetation on the distribution of snow cover), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2005, No. 7, pp. 61–69.
- Kitaev L. M., Ableeva V. A., Asainova Zh.A., Vliyanie lesnoi rastitel'nosti na tendentsii lokal'noi izmenchivosti snegozapasov (The influence of forest vegetation on trends in local variability of snow storage), *Trudy Prioksko-Terrasnogo zapovednika*, Vol. 6, Tula: Izd. Akvarius, 2015, pp. 67–77.
- 5. Kotlyakov V. M., *Glyatsiologicheskii slovar*' (Glaciologica dictionary), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 526 p.
- 6. Mishon V. M., *Teoreticheskie i metodicheskie osnovy otsenki resursov poverkhnostnykh vod v zonakh nedostatochnogo i neustoichivogo uvlazhneniya Evropeiskoi chasti Rossii: Avtoref. diss. dokt. geogr. nauk* (Theoretical and methodological foundations for assessing surface water resources in areas of insufficient and unstable humidification of the European part of Russia, Ext. abstract Doct. geogr. sci. thesis), Voronezh: Izd. Voronezhckogo gosudarstvennogo universiteta, 2007, 242 p.
- Panov V. I., Poteri snega na vetro-metel'nuyu sublimatsiyu i snos v otkrytykh i lesomeliorirovannykh agrolandshaftakh stepnoi zony (Snow loss due to wind-broom sublimation and demolition in open and forest-reclaimed agrolandscapes of the steppe zone), *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*, 2016, No. 2(99), pp. 10–12.
- Titkova T. B., Vinogradova V. V., Otklik rastitel'nosti na izmenenie klimaticheskikh uslovii v boreal'nykh i subarkticheskikh landshaftakh v nachale XXI veka (The response of vegetation to changes in climatic conditions in boreal and subarctic landscapes at the beginning of the XXI century), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 75–86.

- 9. Tsepelev V. Yu., Panidi E. A., Torlopova N. V., Bobkov A. A., Ispol'zovanie kharakteristik rastitel'nogo pokrova taezhnoi zony dlya monitoringa klimaticheskikh izmenenii XXI v. (Using the characteristics of the vegetation cover of the taiga zone for monitoring of climate changes in the XXI century), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2015, Vol. 40, pp. 221–235.
- Beck P. S. Atzberger C., Høgda K. A., Bernt Johansen B., Skidmore Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 100, pp. 321–334.
- 11. Fierz Ch., Field observation and modelling of weak-layer evolution, *Annals of Glaciology*, 1998, Vol. 26, pp. 7–13.
- 12. 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.
- Krankina O. N., Pflugmacher D., Hayes D. J., McGuire A. D., Hansen M. C., Hame T., Elsakov V., Nelson P., Vegetation Cover in the Eurasian Arctic: distribution, monitoring, and role in carbon cycling, *Eurasian arctic land cover and land use in a changing climate*, Springer International Publishing, 2010, pp. 79–108.
- 14. 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.
- 15. 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*, 1995, Vol. 95(1), pp. 77–95.
- 16. 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.