

УДК 531.578.46

**Примеры использования гидрометеорологической информации
в исследованиях изменчивости снегозапасов**

Л.М. Китаев *, Н.Л. Фролова **, В.А. Аблеева***, Ж.А. Асаинова***

* Институт географии РАН

lkitaev@mail.ru

** Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

*** Приокско-Тerrasный государственный биосферный заповедник

В статье приведены примеры использования гидрометеорологической информации в исследованиях изменчивости снежного покрова и определяющих его состояние метеорологических условий – в условиях современного климата. Путем сравнения с данными наземных наблюдений проведена оценка точности данных о запасах воды в снежном покрове восстановленных по информации спутниковых наблюдений (SSM/I): погрешности, достигающие 50% обусловлены с влиянием растительности, мощностью снежного покрова, наличием воды и льда в толще снега. Для бассейна верхней Волги исследована изменчивость снегозапасов как фактор изменений речного стока: тенденция повышения температуры воздуха за счет оттепелей вызывает увеличение зимнего меженного стока и повышения уровня грунтовых вод, что, в свою очередь, может быть причиной уменьшения объема весенних паводков на фоне мало изменяющихся здесь снегозапасов. С применением данных натурных, проведенных по стандартным методикам, наблюдений, для условий центра Европейской части России оценен характер локальной изменчивости снегозапасов в связи с неоднородностью растительности на фоне сезонных изменчивости приземной температуры воздуха и осадков: типизирована зависимость неоднородности пространственного распределения снегозапасов от характера растительных сообществ; выявлены различия сезонной динамики снегозапасов – периодов их нарастания и убывания; определен вклад осадков и температуры воздуха в интенсивность изменений снегозапасов – и в период нарастания и в период убывания снегозапасов превалирует значимость интенсивности осадков при, тем не менее, значимом вкладе изменений температуры воздуха.

Ключевые слова: снегозапасы, температура воздуха, осадки, речной сток, наземные и спутниковые наблюдения, локальная и региональная пространственно-временная изменчивость.

Key words: snow storage, air temperature, precipitation, river flow, ground and satellite observations, local and regional spatial and temporal variability.

Введение

Наиболее распространенные на сегодня в условиях суши элементы криосферы – лед и снег. Лед занимает около 10 % поверхности суши, снежный покров в максимальных зимних запасах – до 50 % суши северного полушария. Являясь продуктом климатических процессов, криосфера, с другой стороны, оказывает влияние на глобальный и региональный климат за счет, в частности, резкого внутригодового изменения альбедо поверхности, во многом определяет сезонную изменчивость физические свойств почвы и ход гидрологических процессов. В статье приведен обзор наших последних результатов использования гидрометеорологической информации в исследованиях изменчивости снежного покрова последних десятилетий – в данном случае на примере Восточно-Европейской равнины. В частности, речь идет о методических подходах при оценке величины снегозапасов спутниковых данных, о специфике определения региональной и локальной изменчивости снегонакопления и возможности выявления ее причин и последствий.

Точность оценки снегозапасов

в ходе дистанционного зондирования поверхности суши

Актуальность использования для мониторинга состояния окружающей среды результатов дистанционного зондирования посредством измерений пассивного микроволнового излучения земной поверхности связана прежде всего с высокой в ходе спутниковых измерений степенью пространственно-временного разрешения. Тем не менее, алгоритмы восстановления снегозапасов по спутниковым данным требуют дополнительных уточнений, для более корректного учета характера растительности, мощности снежного покрова, насыщенности снежной толщи водой и льдом. Для конца февраля нами проведена оценка точности восстановленных по модели Чанга [1] спутниковых данных SSM/I в узлах регулярной сетки $1 \times 1^\circ$ (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>) – путем верификации с данными снегосъемок 115 метеорологических станций (в данном случае имеющих ряды значений на конец февраля).. Сравнение значений метеостанций и соответствующих ячеек сетки спутниковых данных показали, что расхождение между восстановленными и фактическими данными составляет 33-35% в центре и на юге Восточно-Европейской и 53% в бассейне Белого и Балтийского морей, что заметно превышает ошибку в 25%, заявленную авторами алгоритма модельных расчетов.

Результаты наблюдений метеорологических станций на открытых и лесных маршрутах в бассейнах Белого и Баренцева морей показывают, что средние по территории максимальные фактические снегозапасы

залесенных территорий стабильно в многолетнем ходе превышают максимальные снегозапасы открытых пространств со средним соотношением 1.3 (рис. 1А). Для сравнения рассмотрено соотношение восстановленных снегозапасов – для ячеек подспутниковой сетки, совпадающих с расположением метеорологических станций. Многолетний ход восстановленных снегозапасов открытых и залесенных территорий практически идентичен (рис. 1Б) и более чем в два раза занижен относительно фактических значений (рис. 1А). Следовательно, коэффициенты модели восстановления снегозапасов по данным микроволнового излучения требуют существенной доработки для областей с лесной растительностью.

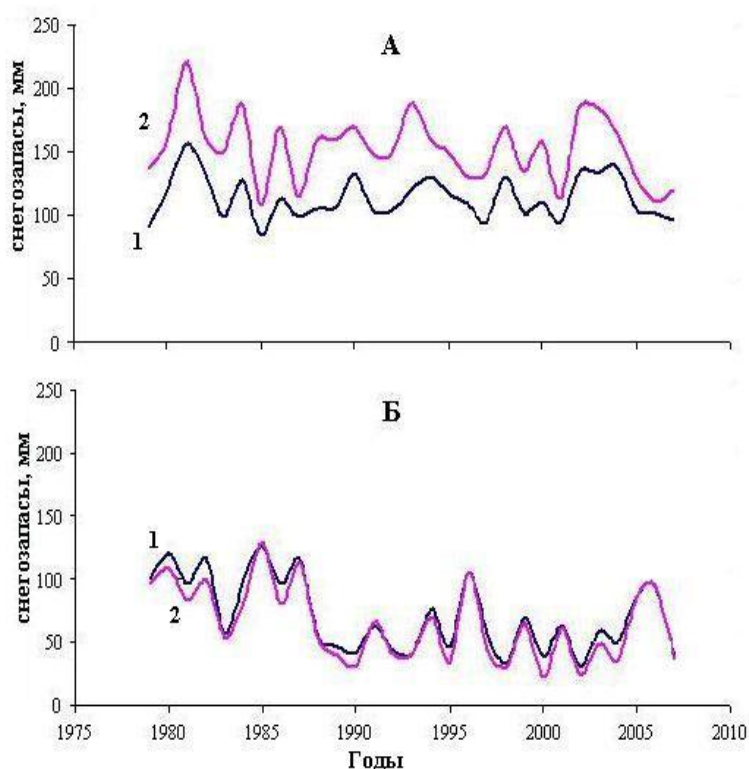


Рис. 1. Многолетний ход фактических (А) и восстановленных (Б) снегозапасов севера Восточно-Европейской равнины; 1 – открытые пространства, 2 – лесные массивы

Роль залесенности в совокупности с высотой снежного покрова в искажении величины восстановленных снегозапасов проиллюстрирована рисунком 2. Расхождение величины восстановленных и фактических снегозапасов максимально на севере Восточно-Европейской равнины (бассейны Белого и Баренцева морей), где низкие фоновые температуры воздуха максимально снижают потенциально возможные искажения микроволнового излучения влажным снегом и ледяными прослойками (рис. 2А). Для существенно менее залесенных водосборов нижней Волги и Дона характерны значительно меньшие расхождения данных, несмотря на

достаточно высокие фоновые температуры воздуха, связанные с этим оттепели и, следовательно, наличие влаги и ледяных прослоек в снежной тоще. Таким образом, можно сделать вывод о том, что лесная растительность в совокупности с мощным снежным покровом на севере Восточно-Европейской равнины обеспечивает максимальные для Восточно-Европейской равнины погрешности восстановленных снегозапасов в сравнении с более теплыми зимой регионами центра и юга, где погрешности связаны с последствиями оттепелей – повышенным содержанием в снежной толще воды и ледяных прослоек.

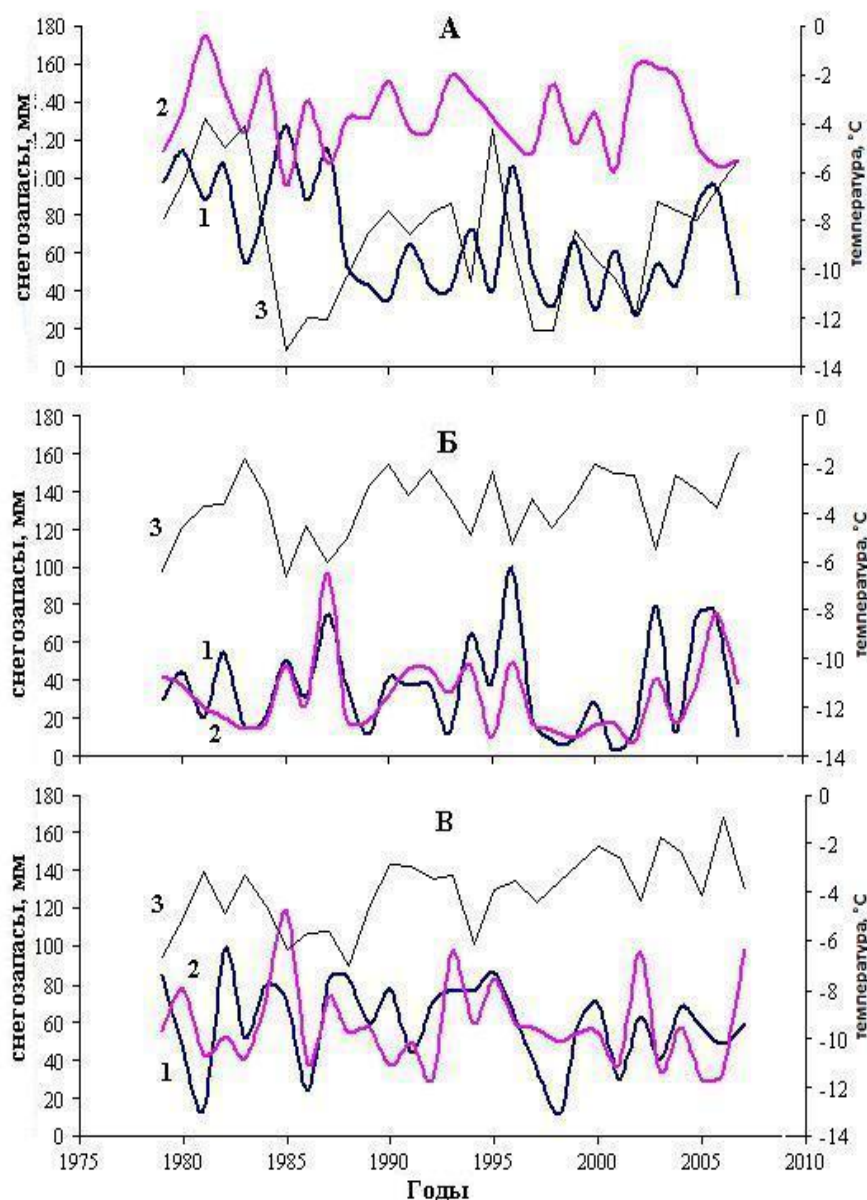


Рис. 2. Многолетний ход характеристик севера Восточно-Европейской равнины (А), водосборов р. Волга (Б) и р. Дон (В). 1– восстановленные снегозапасы; 2 – фактические снегозапасы; 3 – температура воздуха

Изменчивость снегозапасов как фактор изменений речного стока

Существенное в пределах Восточно-Европейской равнины многолетнее повышение приземной температуры воздуха холодного периода при небольших изменениях суммарных осадках (<http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/od2.pdf>) приводит к оттепелям, увеличивающим меженные зимние расходы речных вод и к уменьшению объемов и максимальных расходов весеннего половодья в связи с быстрым оттаиванием почвы во время снеготаяния. В результате, водность рек в холодный сезон увеличилась с 1978 г. на 50–100% в сравнении с предшествующим многолетним периодом, а уровень подземных вод к началу 1990-х годов поднялся на 50–130 см [2, 3]. Означенные изменения в значительной мере связаны с многолетними особенностями формирования снежного покрова, который в средних и высоких широтах является связующим звеном изменений климата и изменений водного баланса. В связи с чем, нами проведена детализация региональных изменений характеристик снежного покрова Восточно-Европейской равнины на примере бассейна Волги (верхнее и нижнее течение соответственно выше и ниже Казани, бассейн Камы) – для уточнения причин изменений характера речного стока в условиях изменений климата последних десятилетий.

Возможность оценки тенденций в изменчивости характеристик снежного покрова и климата связана с наличием в открытом доступе результатов наблюдений за снежным покровом, приземной температурой воздуха и осадками (база данных ВНИИГМИ, www.meteo.ru). Исследованы снегозапасы на конец февраля, средняя приземная температура воздуха и суммарные осадки с начала ноября по конец февраля, для чего использованы данные 115 метеорологических станций: при наличии здесь наблюдений снегозапасов в конце февраля и суточных пропусков измерений приземной температуры воздуха и осадков не более пяти в месяц. Данные пересчитаны в аномалии и интерполированы в узлы регулярной сетки. Ошибка для пространственных оценок величины максимальных снегозапасов может быть принята не более чем в 10 мм [4], ориентировочно 7-15 мм за год для осадков [5] и -0.007 - -0.003 °C для приземной температуры января [6] – без учета в данном случае орографии ввиду относительно небольших перепадов высот. Наибольшие их значения отмечены в верхнем течении Волги (247 мм), наименьшие – в ее нижнем течении (191 мм), что соответствует различиям в ходе средних за холодный период (ноябрь-март) приземных температур воздуха и суммарных осадков.

Значимые многолетние тенденции изменчивости характерны только для аномалий приземной температуры воздуха, коэффициенты линейных трендов составляют для среднего течения Волги 0.139, для нижнего

течения Волги 0.160, для бассейна Камы 0.034 °С за 10 лет. Тенденции изменений аномалий снегозапасов и осадков в данном случае незначимы. Различия среднемноголетних дат максимумов снегозапасов также соответствуют в целом особенностям регионального температурного фона и хода осадков: в более холодных условиях верхнего течения Волги и бассейна Камы, способствующих длительному снегонакоплению – 25 и 20 марта, в более теплых условиях нижнего течения Волги – 9 марта. Заметные многолетние изменения максимумов снегозапасов не выявлены, коэффициенты линейных трендов повсеместно незначимы: соответственно 2.6, 1.2 и 1.0 дней / 10 лет.

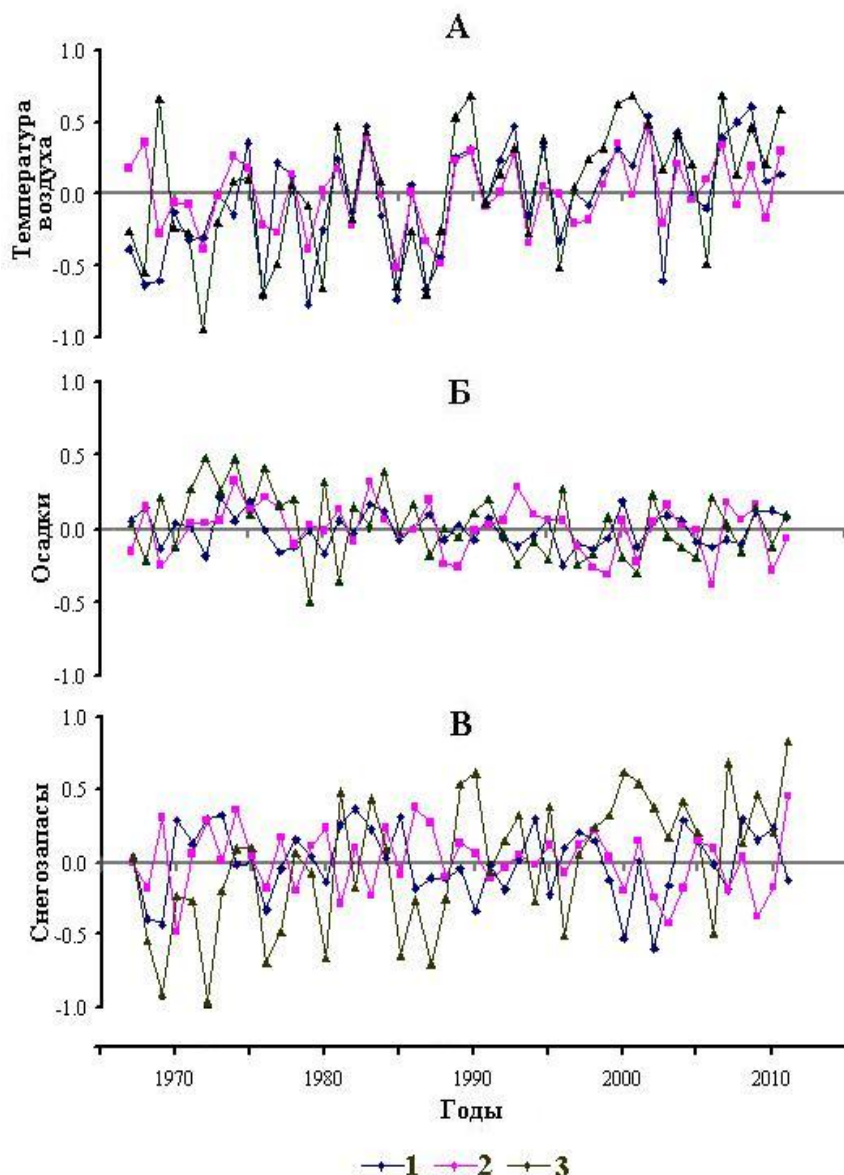


Рис. 3. Многолетний ход и линейные тренды аномалий приземной температуры воздуха (А), суммы осадков (Б) и снегозапасов (В) верхнего течения Волги (1), бассейна Камы (2) и нижнего течения Волги (3).

Синхронность многолетних изменений аномалий климатических характеристик разных частей бассейна Волги прслеживается, в основном, для приземной температуры воздуха (рис. 3) – коэффициенты корреляции температурного хода разных районов в этом случае составляют 0.54-0.64. Синхронность хода суммарных осадков и снегозапасов малы – коэффициенты корреляции соответственно 0.30-0.32 и 0.20-0.39. Следует, однако, учитывать, что при рассмотрении осадков могут сказываться инструментальные погрешности в процессе наблюдений [7, 8], в случае снегозапасов – особенности метелевого перераспределения снега и неоднородность снегонакопления, связанная с различиями растительности и испарения с поверхности снежной толщи [9, 10].

Многолетние изменения продолжительности периода со снежным покровом несущественны – значения коэффициентов линейного тренда незначимы, за исключением отрицательного коэффициента для нижнего течения Волги (-4.34 дней / 10 лет). По-видимому, стабильность снежного периода севера исследуемой территории связано с многолетним увеличением осадков при низких фоновых температурах зимнего периода; в южной части региона, при более теплых условиях зимы, вклад многолетнего роста температуры воздуха в изменчивость снегозапасов увеличивается – период со снежным покровом становится короче.

Исследована важная для гидрологического режима региона продолжительность периода убывания снегозапасов – время от даты максимума снегозапасов до даты полного исчезновения снежного покрова. Продолжительность этого периода в верхнем течении Волги и в бассейне Камы составляют 37 и 43 дня, в нижнем течении Волги 19 дней – соответственно 19, 22 и 12 % от общей продолжительности снежного периода. Регрессионная зависимость многолетних изменений продолжительности периода убывания снегозапасов от изменчивости их максимальных значений, от приземной температуры воздуха и от суммарных осадков достаточно высока для всего бассейна Волги – при общих коэффициентах регрессии 0.7-0.8. Основной вклад в процесс убывания снега соответственно регрессионным бета-коэффициентам оказывают прежде всего осадки (0.467 - 0.762), затем приземная температура воздуха (-0.252 - -0.456), вклад же максимальных снегозапасов в регрессию незначим.

В последние десятилетия отмечается перераспределение внутригодового хода речного стока Восточно-Европейской равнины : при снижении объема весеннего половодья меженный сток увеличился с 1978 г. на 50–100% в сравнении с предшествующим многолетним периодом, а уровень подземных вод поднялся на 50–130 см [2, 3, 11].

Для исследуемой территории, где максимальные снегозапасы в многолетнем аспекте меняются мало, а продолжительность периода со

снежным покровом неизменна на севере и уменьшается на юге, увеличение объема стока и повышение уровня грунтовых вод в меженный период может быть связано с устойчивым многолетним повышением приземной температуры воздуха (рис. 3), усиливающимся снеготаянием во время оттепелей с образованием склонового стока и пополнением грунтовых вод. В результате при увеличении меженного тока и объема подземной составляющей водного баланса зимой, весенний сток имеет тенденции к снижению (рис. 4).

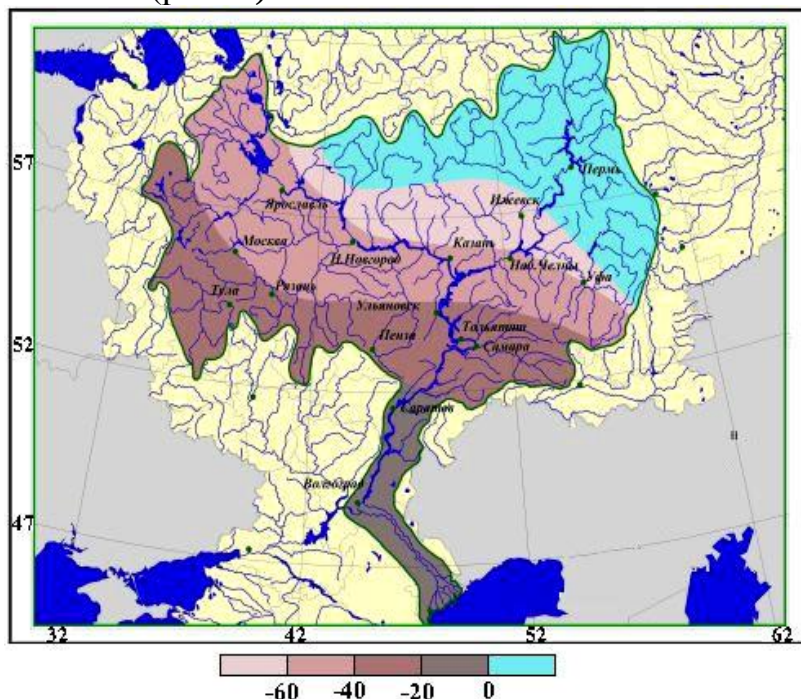


Рис. 4. Изменение максимальных расходов воды (%) за 1970–2005 гг. по сравнению с периодом 1935–1969 гг. [11].

Локальная изменчивость снегозапасов и метеорологического режима

Важной составляющей исследований снежного покрова являются натурные исследования локальной структуры распределения снежного покрова, необходимые для последующих уточнений региональных обобщений, в частности посредством учета структуры растительного покрова при осреднении снегозапасов. Так, в частности, соотношение снегозапасов на открытых и закрытых (лесных) участках по данным метеорологических станций водосбора Белого и Баренцева морей составляет в среднем 0.74 (рис. 1), что несомненно влияет на точность оценок характера снегонакопления.

В ходе исследований нами типизирована локальная изменчивость снегозапасов в климатических условиях последних тридцати лет – на примере сосняка, лиственного массива и открытого пространства в пределах Приокско-Тerrasного заповедника. Особенностью данных работ является проведение в пределах каждого экспериментального участка

наблюдений в соответствии со стандартными методическими подходами метеостанций гидрометеорологической сети – в данном случае при исследованиях приземной температуры воздуха и осадков, а также при организации снегомерных маршрутах наблюдений на каждом характерном участке. В результате, в ходе наблюдений получен набор стандартных же показателей, пригодных для уточнения региональных обобщений метеорологических характеристик.

Для период 1988-2014 гг. оценен характер распределения снегозапасов: наибольший максимум в 105 мм отмечен в лиственном массиве; соотношение снегозапасов составляет в среднем 0.78 для сосняка и лиственного массива и 0.76 для открытого участка и лиственного массива. Причина – перехват снега кронами хвойных деревьев с последующим его испарением, метелевый перенос и интенсивное испарение с поверхности снега на открытых пространствах. заметных многолетних тенденций в изменениях приземной температуры воздуха, осадков и снегозапасов не обнаружено, коэффициенты линейных трендов всех характеристик незначимы.

Исследована динамика снегозапасов в периоды нарастания их до максимума и в период последующего убывания до полного разрушения устойчивого снежного покрова в каждом из характерных участков. Интенсивность убывания снегозапасов за счет быстрого весной повышения температуры воздуха, повсеместно значительно превышает интенсивность нарастания снегозапасов. Наименьшая интенсивность изменений снегозапасов характерна для сосняка (в среднем 6.2 мм за период нарастания и -12.7 мм за период убывания): в период нарастания снегозапасов кроны хвойных деревьев задерживают твердые осадки, снижая скорость снегонакопления; в период убывания снегозапасов, в т.ч. в период весеннего снеготаяния, кроны хвойных деревьев создают тень и защиту от ветра, замедляя таяние снега и испарение с него.

Расчет множественной регрессии показал высокую зависимость интенсивности изменений снегозапасов от изменчивости прежде всего осадков, и лишь во вторую очередь от изменений приземной температуры воздуха. Многолетних тенденций в ходе величины снегозапасов, интенсивности снегонакопления (как в период нарастания, так и в период убывания) не обнаружено, коэффициенты линейных трендов незначимы.

Результаты

Показаны примеры использования гидрометеорологической информации в исследованиях изменчивости снегозапасов в условиях меняющегося климата последних десятилетий. необходимость постоянного совершенствования баз данных и методических подходов в связи с появлением новых технологий в исследованиях. В частности, оценена

точность спутниковой информации при определении снегозапасов посредством учета таких особенностей ландшафта как характер растительности, мощность снежного покрова и фоновый температурный режим. Сопряженное использование различных информационных блоков – в данном случае блока с метеорологическими данными и блока с гидрологическими данными – позволило провести междисциплинарные оценки изменчивости условий зимне-весеннего периода. Наличие стандартных методов сбора и накопления информации определило возможность исследования метеорологических и криосферных процессов на локальном пространственном уровне, что в перспективе позволит уточнять региональные оценки изменчивости состояния окружающей среды.

Литература

- 1 Chang A., Rango A. Algorithm Theoretical Basis Document for the AMSR!E Snow Water Equivalent Algorithm. Version 3.1. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2000.
2. Георгиевский В. Ю. Изменение стока рек России и водного баланса Каспийского моря под влиянием хозяйственной деятельности и глобального потепления. Автореф. дисс. доктора географ. наук.. СПб.: СПбГУ, 2005.
3. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата // Труды VI Всероссийского гидрологического съезда. Москва, 2007. М: Метеоагентство Росгидромета, 2007. С. 159–163.
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. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами // Метеорология и гидрология. 2009/ № 9. С. 66-74.
6. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Клещенко Л.К., Смирнов В.Д. О пространственном осреднении в задачах мониторинга климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2013. Том XXV. С. 42-71
7. Богданова Э. Г., Ильин Б. М., Драгомилова И. В. Опыт применения усовершенствованной методики корректировки суточных сумм осадков в различных климатических условиях // Труды ГГИ, 2003. Вып 551. С. 23-50.
8. Голубев В. С. Изучение точности учета атмосферных осадков // Труды ГГИ.1969. Вып. 176 С. 149-163.
9. Китаев Л.М., Титкова Т.Б.. Локальная изменчивость снегозапасов в условиях современных изменений климата // Динамика многолетних

процессов в экосистемах Центрально-Лесного заповедника. Под ред. А.С. Желтухина. ISBN 978-5-350-00268-3. Великие Луки, ООО “Великолукская городская типография”. 2012. С. 33-40.

10. Мишон В.М. Теоретические и методические основы оценки ресурсов поверхностных вод в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения европейской части России. Автореф. дисс. доктора географ. наук. Воронеж, Воронежский государственный университет. 2007.

11 Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология,. 2013. № 4. С. 3-12.