Точность воспроизведения по спутниковым данным аномальных значений снегозапасов

Л.М. Китаев¹, В.В. Тихонов², Т.Б. Титкова¹

¹ *Институт географии РАН, Москва, 109017, Россия*

E-mail: lkitaev@mail.ru

² *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

Рассматривается точность воспроизведенных по спутниковым данным пространственно-временных изменений снегозапасов с учетом изменений приземной температуры воздуха и осадков зимнего периода. Данный анализ проведен в первую очередь для случаев аномальных снегонакоплений. Анализ представлен на примере территории Евразии в границах России для периода 1979–2007 гг. Невязка среднемноголетних фактических и восстановленных снегозапасов составляет 17–45%. Стандартное отклонение восстановленных и фактических снегозапасов различается более чем в два раза. Наблюдается небольшой рост фактических снегозапасов при снижении снегозапасов восстановленных. Наибольшие ошибки восстановленных снегозапасов присущи районам с большой толщиной снега, лесной растительностью, горным рельефом, в местах с заметным многолетним ростом снегозапасов. Выявлены аномалии фактических и восстановленных снегозапасов, рассчитан их вклад в общую изменчивость. Отмечено, что для исследуемого периода времени совпадений аномальных случаев фактических и восстановленных снегозапасов не выявлено. Таким образом, фактические и восстановленные по спутниковым данным снегозапасы имеют малую схожесть в значениях, пространственном и временном распределении, а также в проявлении аномалий. Алгоритмы пересчета спутниковых данных требуют доработки с учетом состояния поверхности и характеристик структуры снежной толщи. Полученные в работе закономерности могут служить как для уточнения значений уже восстановленных снегозапасов, так и для коррекции процедуры их расчета.

Ключевые слова: фактические и восстановленные снегозапасы, приземная температура воздуха, осадки, многолетняя изменчивость, пространственная изменчивость, аномальные значения характеристик

Одобрена к печати: 27.01.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-27-39

Введение

Особенности метеорологического режима холодного периода средних и высоких широт Евразии (прежде всего, снегозапасов, приземной температуры воздуха, осадков) обуславливают недостаток или избыток почвенной влаги, экстремально малые или катастрофически большие объемы весеннего половодья, состояние биоты, особенности хозяйственной деятельности. В настоящее время исследования изменчивости характеристик климата проводятся по многим направлениям. Пространственная вариабельность альбедо поверхности в зимний период, связанная с ландшафтными условиями и характером снегонакопления, установлена рядом исследователей (Котляков, 2004; Рубинштейн и др., 2006; Китаев, Титкова, 2011; Копанев, 1978; Трофимова, 2014) и не может не оказывать влияния на характер обмена теплом и влагой между поверхностью и атмосферой. Многолетнее повышение приземной температуры воздуха обуславливает изменчивость характеристик снежного покрова: в частности, В.В. Поповой (Попова, Полякова, 2013) выявлена зависимость сроков залегания снежного покрова от характера потепления и особенностей атмосферной циркуляции. Данные об изменчивости снегозапасов и толщины снега в последние десятилетия в связи с изменениями приземной температуры воздуха приведены, в частности, в работах А.Н. Кренке (Кренке и др., 2000, 2009) и В.М. Котлякова (Котляков, 2004). Региональные тенденции увеличения доли жидких осадков зимой пока не влияют на из-

менчивость снегонакопления (Китаев и др., 2010); так же в большинстве регионов Севера Евразии еще не наступил предел нарастания снегозапасов в связи с потеплением (Кренке и др., 2009).

Особое значение имеет оценка взаимосвязи изменчивости приземной температуры воздуха, осадков и снегозапасов: их изменения в современных условиях имеют неоднозначный пространственный и временной характер – здесь возможны как положительные, так и отрицательные тенденции, не совпадающие в локальном и региональном масштабах (Brown, Mote, 2009; Kitaev et al., 2002; Китаев и др., 2012). Кроме оценок взаимосвязи изменчивости метеорологических характеристик, полученных на основе статистического анализа, особое место в исследованиях зимнего периода занимает изучение случаев аномальных значений характеристик. В связи с чем интересен метод имитационного моделирования, предложенный В.П. Галаховым (Галахов, 2001) и позволяющий оценить снежность зим на основе сочетаний величин значений метеорологических характеристик. Метод изначально апробирован на примере горных территорий с целью, прежде всего, выявления условий формирования аномальных снегозапасов и потенциально связанных с ними лавинных явлений (Галахов, 2003; Олейников, Володичева, 2001), но применим также и для равнин (Володичева и др., 2004).

С появлением в свободном доступе данных дистанционного зондирования возникли новые возможности оценки состояния атмосферы, земной и океанической поверхности – в частности, снежного покрова, материковых (горных) и морских льдов как важных для средних и высоких широт элементов природной среды. К несомненным положительным качествам спутниковых данных относится детальное пространственное и временное разрешение в ходе наблюдений. Отрицательная сторона заключается в погрешностях калибровки бортовой аппаратуры (в частности, радиометров), и в том числе в нарушении однородности многолетних рядов данных, возникающих в моменты установки на вновь запускаемые спутники усовершенствованных приборов (Bjorgo et al., 1997; Cavalieri et al., 2003). Несовершенными остаются также алгоритмы пересчета характеристик микроволнового излучения, получаемых с бортовых радиометров, в конкретные характеристики поверхности (Chang, Rango, 2000). В частности, алгоритм расчета по спутниковым данным снегозапасов допускает ошибку 25% и более – в связи с наличием древесной растительности, орографией, значительной толщиной снега (Носенко О.А., Носенко Г.А., 2008; Телегина и др., 2014). Кроме того, учет в моделях восстановления снегозапасов характеристик стратиграфии снежной толщи существенно повышает качество расчетов (Китаев и др., 2014; Boyarskii, Tikhonov, 2000).

Основная задача данной работы состоит в оценке точности воспроизведенных по спутниковым данным пространственно-временных изменений снегозапасов с учетом изменений приземной температуры воздуха и осадков зимнего периода (прежде всего, для аномальных случаев снегонакопления). Анализ проводится на примере территории Евразии в границах России. За временной период приняты 1979–2007 гг. в соответствии с наличием в открытом доступе однородных рядов фактических и восстановленных данных.

Исходные материалы и методика исследований

Восстановленные по спутниковым данным снегозапасы (<http://nsidc.org/data/NSIDC-0271>) являются результатом модельной обработки измерений микроволнового излучения поверхности суши спутниковыми радиометрами (SMMR, SSM/I, SSMI/S) с разрешением 25×25 км и осредненные помесечно (Chang et al., 2000; Tait et al., 2000). Наиболее репрезентативным по калибровке аппаратуры и непрерывности данных считается период с 1979 г. (Bjorgo et al., 1997; Cavalieri et al., 2003). Фактические данные представлены материалами наблюдений восьмисот метеорологических станций (<http://www.meteo.ru>), проводимых в соответствии с методиками Гидрометслужбы (Наставление..., 1985): ежедекадно – по снегомерным маршрутам для снегозапасов, посуточно – для приземной температуры воздуха и осадков. Для сравнительного анализа характеристик использованы средние за февраль фактические и восстановленные по спутниковым данным снегозапасы, а также осредненные за ноябрь–февраль включительно фактические приземная температура воздуха и осадки для периода 1979–2007 гг.

Для анализа пространственного распределения данные интерполированы в узлы регулярной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ методом кригинга (kriging) – одним из видов обобщенной линейной регрессии для моделирования поверхностей, при расчете которой минимизируется стандартное отклонение (Байков и др., 2010). В этом случае погрешность интерполяции при осреднении приземной температуры воздуха может достигать для годовых значений $-0,007^\circ\text{C}$ – $-0,003^\circ\text{C}$ (Жильцова, Анисимов, 2009), для осадков – 15 мм (Груза и др., 2013). Для снегозапасов погрешность может быть принята не более чем в 10 мм для Восточно-Европейской равнины (Кислов и др., 2001), для остальных районов, по-видимому, ориентировочно равной ошибке для осадков – 7–15 мм.

Региональные обобщения проводились в границах секторов для Восточно-Европейская равнины (30° – 60° в.д.), Западной Сибири (60° – 90° в.д.), Центральной Сибири (90° – 125° в.д.), Восточной Сибири и Дальнего Востока (125° – 180° в.д.). На юге исследуемая территория ограничена 50-й параллелью, поскольку в более низких широтах России количественная оценка малых значений снегозапасов равнинных территорий и снегозапасов высокогорных областей не совсем объективна статистически.

Пространственно-временная изменчивость снегозапасов

Изучение изменчивости снегонакопления, в том числе с учетом изменений приземной температуры воздуха и осадков, имеют многолетнюю историю. Результаты исследований последних десятилетий обобщены, в частности, во Втором оценочном докладе об изменениях климата (Второй оценочный доклад..., 2014). Далее приводятся общие показатели изменений фактических снегозапасов с целью оценки различий со снегозапасами, восстановленными в условиях фактических изменений приземной температуры воздуха

и осадков зимнего периода. Так, для снегозапасов характерны следующие среднемноголетние показатели многолетних изменений:

- Восточно-Европейская равнина: среднее по фактическим данным – 91 мм и по восстановленным данным – 63 мм, стандартное отклонение – 11,8 мм и 18,8 мм, коэффициент линейного тренда – 0,63 мм/год (значим) и -1,1 мм/год (значим);
- Западная Сибирь: среднее по фактическим данным – 93 мм, по восстановленным данным – 127 мм, стандартное отклонение – 5,7 мм и 17,4 мм, коэффициент линейного тренда – 0,24 мм/год (значим) и -0,72 мм/год (значим);
- Центральная Сибирь: среднее по фактическим данным – 74 мм, по восстановленным данным – 136 мм, стандартное отклонение – 8,8 мм и 16,2 мм, коэффициент линейного тренда – 0,12 мм/год (незначим) и -0,42 мм/год (незначим);
- Восточная Сибирь и Дальний Восток Сибирь: среднее по фактическим данным – 121 мм, по восстановленным данным – 100 мм, стандартное отклонение – 16,4 мм и 11,8 мм, коэффициент линейного тренда – 0,17 мм/год (незначим) и -0,29 мм/год (незначим);
- В целом: среднее по фактическим данным – 96 мм, по восстановленным данным – 109 мм, стандартное отклонение – 5,7 мм и 14,5 мм, коэффициент линейного тренда – 0,32 мм/год (значим) и -0,75 мм/год (значим).

Показатели по фактическим данным (наземные наблюдения) для приземной температуры воздуха и осадков:

- Восточно-Европейская равнина: среднее по температуре – -8,5°C и среднее по осадкам – 104 мм; стандартное отклонение – 1,7 °C и 11,4 мм; коэффициенты линейного тренда – 0,06 °C/год (значим) и -0,05 мм/год (незначим);
- Западная Сибирь: среднее по температуре – -16,1°C и среднее по осадкам – 112 мм; стандартное отклонение – 1,9°C и 9,7 мм; коэффициенты линейного тренда – 0,06 °C/год (значим) и -0,05 мм/год (незначим);
- Центральная Сибирь: среднее по температуре – -26,3°C и среднее по осадкам – 101 мм; стандартное отклонение – 1,7°C и 8,4 мм; коэффициенты линейного тренда – 0,03 °C/год (незначим) и -0,28 мм/год (незначим);
- Восточная Сибирь и Дальний Восток: среднее по температуре – -25,1°C и среднее по осадкам – 69 мм; стандартное отклонение – 1,7°C и 8,4 мм; коэффициенты линейного тренда – 0,03°C/год (незначим) и -0,28 мм/год (незначим);
- В целом: среднее по температуре – -19,5°C и среднее по осадкам – 96 мм; стандартное отклонение – 1,2 °C и 5,6 мм; коэффициенты линейного тренда – 0,03 °C/год (незначим) и 0,01 мм/год (незначим).

Таким образом, невязка осредненных по регионам среднемноголетних снегозапасов лежит в диапазоне 17–45% при обозначенной разработчиками алгоритма расчета восстановленных данных погрешности не более чем в 25% (Chang et al., 2000). Стандартное отклонение, рассчитанное для восстановленных снегозапасов, повсеместно более чем в два раза превышает величину стандартного отклонения для фактических данных. Это может быть связано с погрешностями в интерполяции для относительно небольшого количества

неравномерно распределенных по площади метеорологических станций – в отличие от результатов спутниковых наблюдений, покрывающих территорию изначально равномерной сеткой с разрешением 25×25 км.

Судя по приведенным выше данным и *рис. 1*, на фоне потепления и незначимых тенденций в изменении осадков повсеместно наблюдается небольшой, но значимый многолетний рост фактических снегозапасов при снижении снегозапасов восстановленных. Можно предположить, что многолетнее потепление и, соответственно, увеличение количества оттепелей обуславливают рост влажности снежной толщи и количества в ней льда, что занижает со временем восстановленные снегозапасы за счет погрешностей наблюдений и расчетов.

Рис. 1. Многолетняя изменчивость: А – приземной температуры воздуха, Б – осадков и В – снегозапасов (1 – фактические, 2 – восстановленные), Г – ошибок восстановленных снегозапасов

Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда фактических и восстановленных снегозапасов (рис. 2) в целом находится в противофазе. По-видимому, при многолетнем увеличении фактических снегозапасов их восстановленные значения имеют тенденцию к снижению за счет увеличения погрешности при увеличении снежной толщи.

Рис. 2. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда фактических (А) и восстановленных (Б) снегозапасов

Временной ход погрешности восстановленных данных представлен на рис. 1, ее пространственное распределение – на рис. 3. Наибольшие ошибки характерны для территорий с большими снегозапасами, лесной растительностью, горным рельефом – север Восточно-Европейской равнины и Центральной Сибири, Среднеколымское нагорье и горы юга Сибири, Чукотка и Камчатка. Значительные погрешности на юге Восточно-Европейской равнины связаны, по-видимому, с теплыми зимами при продолжающемся потеплении с частыми оттепелями и, соответственно, с повышенным количеством влаги и льда в снежной

толще. Относительно малые погрешности восстановленных снегозапасов приурочены в основном к равнинным, слабо залесенным территориям – степная зона в среднем течении Волги и Дона, Западная Сибирь, нижнее течение рек Хатанга и Оленек.

Рис. 3. Погрешность восстановленных снегозапасов относительно фактических значений (%)

Случаи аномалий снегозапасов

Как уже упоминалось, аномальными значениями для фактических и восстановленных снегозапасов (среднее за февраль) принимаются значения, превышающие их стандартное отклонение. Для получения аномалий в многолетнем ходе характеристик для каждого года осреднялись значения соответствующей характеристики по всем ячейкам каждого из исследуемых регионов. Полученные таким образом для каждого региона многолетние ряды (1979–2007 гг.) освобождались от тренда и затем по ним рассчитывались средняя величина и стандартное отклонение (одинарное и удвоенное). После чего производилась выборка значений, превышающих величину одинарного и величину удвоенного стандартного отклонения – для положительной и отрицательной областей распределения характеристик. Аналогичным образом рассчитывались аномальные значения для наблюдаемых на метеорологических станциях приземной температуры воздуха и осадков (среднее за ноябрь–февраль включительно) – для учета фоновых метеорологических условий. Распределение годовых аномалий приземной температуры воздуха и осадков приведены ниже:

- Восточно-Европейская равнина:
 - температура, положительная область значений – 1979, 1985, 1987, 1998, 2003; отрицательная область значений – 1981, 1983;
 - осадки, положительная область значений – 1980, 1981, 1984, 1999, 2005, 2006; отрицательная область значений – 1985, 1987, 1990, 1992, 2002, 2007.

- Западная Сибирь:
 - температура, положительная область значений – 1979, 1985, 1998, 2001; отрицательная область значений – 1983, 1984, 1994, 1998, 2001;
 - осадки, положительная область значений – 1984, 1991, 2003, 2005;
 - отрицательная область значений – 1979, 1983, 1999, 2002; 2004, 2007.
- Центральная Сибирь:
 - температура, положительная область значений – 1979, 1985, 2001; отрицательная область значений – 1984, 1992, 1995, 2002;
 - осадки, положительная область значений – 1985, 1986, 1991, 1988, 1999; отрицательная область значений – 1982, 1983, 1989, 2002, 2004.
- Восточная Сибирь и Дальний Восток:
 - температура, положительная область значений – 1983, 1988, 1990, 1998, 1999; отрицательная область значений – 1986, 1989, 1996, 2006.
 - осадки, положительная область значений – 1979, 1986, 1994, 1998; 1999, 2001; отрицательная область значений – 1981, 1984, 1993, 1996, 2007.

Годовые аномалии снегозапасов распределены следующим образом:

- Восточно-Европейская равнина:
 - фактические снегозапасы, положительная область значений – 1979, 1985, 1997, 2007; отрицательная область значений – 1987, 1993, 1994, 2002;
 - восстановленные снегозапасы, положительная область значений – 1983, 1993, 1995, 2002; отрицательная область значений – 1987, 1989, 1996, 2003, 2005, 2006.
- Западная Сибирь:
 - фактические значения, положительная область значений – 1983, 1990, 1998, 2003; отрицательная область значений – 1980, 1981, 1984, 2007;
 - восстановленные снегозапасы, положительная область значений – 1988, 1991, 2002; отрицательная область значений – 1982, 1984, 1999, 2005.
- Центральная Сибирь:
 - фактические снегозапасы, положительная область значений – 1987, 1990, 1998, 2001, 2003; отрицательная область значений – 1983, 1984, 1991, 2007;
 - восстановленные снегозапасы, положительная область значений – 1989, 1990, 1994, 2001; – отрицательная область значений – 1983, 1984, 1999, 2006.
- Восточная Сибирь и Дальний Восток:
 - фактические снегозапасы, положительная область значений – 2000, 2001, 2003; отрицательная область значений – 1991, 1999, 2005;
 - восстановленные снегозапасы, положительная область значений – 1979, 1989, 1993, 1995; отрицательная область значений – 1984, 1985, 1987, 2006.

В целом для всех фактических данных характерна асимметрия распределения значений, выражающаяся в данном случае в разнице количества случаев с положительными и отрицательными аномалиями. Наблюдается очень слабая синхронность проявления региональных аномалий снегозапасов, приземной температуры воздуха и осадков. Одновре-

менно в двух и более регионах аномалии отмечаются: для приземной температуры воздуха в 1979, 1983, 1985, 1998 гг., для осадков в 1984, 2002, 2004, 2005 гг., для снегозапасов в 1984, 1990, 1998 гг. Как правило, одновременное появление аномалий происходит в соседних регионах: Восточно-Европейская равнина – Западная Сибирь, Центральная Сибирь – Восточная Сибирь. Исключительно редки случаи совпадения аномалий фактических снегозапасов с аномалиями приземной температуры воздуха и осадков, поскольку формирование снежного покрова является результатом достаточно сложного взаимодействия изменений температуры воздуха и осадков. Для исследуемого периода времени совпадений аномальных случаев фактических и восстановленных снегозапасов не отмечено.

Выводы

Сравнительный анализ многолетних рядов показал, что невязка осредненных по крупным физико-географическим регионам среднемноголетних снегозапасов составляет 17–45% при обозначенной разработчиками алгоритма расчета восстановленных данных погрешности не более чем в 25%. Стандартное отклонение, рассчитанное для восстановленных снегозапасов, повсеместно более чем в два раза превышает величину стандартного отклонения для фактических данных, что может быть связано как с неточностями воспроизведения восстановленных снегозапасов, так и с погрешностями в интерполяции для неравномерно распределенных по площади метеорологических станций. На фоне потепления и незначимых тенденций в ходе осадков в пределах всех регионов наблюдается небольшой рост фактических снегозапасов при снижении снегозапасов восстановленных. Можно предположить, что многолетнее потепление и, соответственно, увеличение количества оттепелей обуславливают рост влажности снежной толщи и количества в ней льда, что занижает со временем восстановленные снеозапасы за счет погрешностей наблюдений и расчетов.

Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда фактических и восстановленных снегозапасов в целом находится в противофазе. Наибольшие ошибки восстановленных снегозапасов присущи районам с большой толщиной снега, лесной растительностью, горным рельефом, в местах с заметным многолетним ростом снегозапасов – север Восточно-Европейской равнины и Центральной Сибири, Среднеколымское нагорье и горы юга Сибири, Чукотка и Камчатка. Значительные погрешности на юге Восточно-Европейской равнины связаны, по-видимому, с теплыми зимами при продолжающемся потеплении с частыми оттепелями и, соответственно, с повышенным количеством влаги и льда в снежной толще. Относительно малые погрешности восстановленных снегозапасов приурочены в основном к равнинным или залесенным территориям с холодными зимами и средней величиной снегозапасов – степная зона в среднем течении Волги и Дона, Западная Сибирь, нижнее течение рек Хатанга и Оленек.

Многолетний ход аномалий фактических снегозапасов очень редко совпадает с ходом аномалий приземной температуры воздуха и осадков. Одновременно в двух и более

регионах (как правило, соседних) аномалии отмечаются: для фактических снеготпасов – в 9% случаев, для приземной температуры воздуха и осадков – в 12% случаев. В данном случае причиной несовпадений следует, по-видимому, считать неучет сезонной динамики колебаний приземной температуры воздуха и осадков, что, в свою очередь, связано с циркуляционными процессами в атмосфере. Для исследуемого периода времени совпадений аномальных случаев фактических и восстановленных снеготпасов не отмечено.

Таким образом, фактические и восстановленные по спутниковым данным снеготпасы имеют малую схожесть в значениях, пространственном и временном распределении, в проявлении аномалий – алгоритмы пересчета спутниковых данных требуют доработки с учетом состояния поверхности. Полученные в работе закономерности могут служить как для уточнения значений уже восстановленных снеготпасов, так и для коррекции процедуры их расчета.

Работа выполнена при поддержке Программы ФНИ государственных академий наук 0148-2014-0015 и Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект № 16-05-00164

Литература

1. Байков В.А., Бакиров Н.К., Яковлев А.А. Новые подходы в теории геостатистического моделирования // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14. № 2 (37). С. 209–215.
2. Володичева Н.А., Китаев Л.М., Кренке А.Н., Олейников А.Д. Межгодовые изменения снежности на Кавказе и Восточно-Европейской равнине // Лед и снег. 2004. № 96. С. 138–143.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Из-во Росгидромета, 2014. 1008 с.
4. Галахов В.П. Имитационное моделирование как метод гляциологических реконструкций горного оледенения. Новосибирск: Наука, 2001. 134 с.
5. Галахов В.П. Условия формирования и расчет максимальных снеготпасов в горах. Новосибирск: Наука, 2003. 104 с.
6. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Клеценко 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. 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.
8. Кислов А.В., Китаев Л.М., Константинов И.С. Статистическая структура крупномасштабных особенностей поля снежного покрова // Метеорология и гидрология. 2001. № 8. С. 98–104.
9. Китаев Л.М., Кренке А.Н., Титкова Т.Б. Климатические условия пределов нарастания снеготпасов на севере Евразии // Лед и снег. 2004. № 94. С. 117–126.
10. Китаев Л.М., Трофимова Л.Б., Комаровская Е.В., Данилович И.С., Бильдюг А.А. Многолетняя изменчивость осадков и формирование снежного покрова Восточно-Европейской равнины // Криосфера Земли. 2010. № 3. С. 77–81.
11. Китаев Л.М., Тихонов В.В., Боярский Д.А., Титкова Т.Б., Комарова Н.Ю. Снежный покров Восточно-Европейской равнины по данным многочастотной микроволновой спутниковой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 249–257.
12. Китаев Л.М., Титкова Т.Б., Коробов Е.Д. Изменчивость снеготнакопления и динамика температуры почвы в связи с изменениями локальной метеорологической обстановки // Многолетние процессы в природных комплексах заповедников России. Великие Луки: ООО “Великолукская городская типография”, 2012. С. 19–26.
13. Китаев Л.М., Титкова Т.Б. Изменчивость альбедо снежного покрова – анализ спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 47–54.
14. Копанев И.Д. Снежный покров на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 181 с.
15. Котляков В.М. Снежный покров и ледники земли. М.: Наука, 2004. 448 с.
16. Кренке А.Н., Китаев Л.М., Разуваев В.Н. Изменение сроков залегания снежного покрова на территории бывшего СССР в целом и его регионов в 1966–1995 гг. // Криосфера Земли. 2000. № 4. С. 54–60.
17. Кренке А.Н., Китаев Л.М., Титкова Т.Б. Оценка изменений снеготпасов на территории Северной Евразии в начале XXI в. (на основе модельных прогнозов зимних температур и осадков) // Материалы гляциологических исследований. 2009. Вып. 107. С. 31–37.

18. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3 часть 1. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 299 с.
19. Носенко О.А., Носенко Г.А. Особенности поведения радиоярких температур SSM/I в субполярных регионах России в течение зимы 2006/2007 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 160–164.
20. Олейников А.Д., Володичева Н.А. Повторяемость многоснежных зим и лавинных катастроф на Большом Кавказе в XX столетии // Лед и снег. 2001. № 91. С. 87–94.
21. Попова В.В., Полякова И.А. Изменения сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936–2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // Лед и снег. 2013. Т. 53. № 2. С. 29–39.
22. Рубинштейн К.Г., Громов С.С., Золоева М.В. Динамическая классификация снежного покрова // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. № 57. С. 31–37.
23. Телегина А.А., Фролова Н.Л., Китаев Л.М., Титкова Т.Б. Оценка точности спутниковой информации о снегозапасах крупных водосборов европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 38–49.
24. Трофимова Е.Б. Отражающая способность снежного покрова // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Оренбург: Оренбургский государственный университет. 2014. С. 1498–1500.
25. Bjorgo E., Johannessen O la M., Miles M.W. Analysis of merged SMMR-SSMI time series of Arctic and Antarctic sea ice parameters 1978–1995 // Geophysical Research Letters. 1997. Vol. 24. No. 4. P. 413–416.
26. Boyarskii D.A., Tikhonov V.V. The Influence of Stratigraphy on Microwave Radiation from Natural Snow Cover // J. of Electromagnetic Waves and Applications. 2000. Vol. 14. No. 9. P. 1265–1285.
27. Brown R.D., Mote P.W. The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing Climate // Journ. of Climate. 2009. Vol. 22. No. 8. P. 2124–2145.
28. Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Vinnikov K.Y. 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability // Geophysical research letters, 2003. Vol. 30. No. 18. P. 124–139. DOI: 10.1029/2003GL018031..
29. 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. 124 p.
30. Kitaev L., Krenke A., Konstantinov I., Kislov A., Razuvaev V., Martuganov R. The snow cover characteristics of Northern Eurasia and their relationship to climatic parameters // Boreal Environment Research. 2002. Vol. 7. No. 4. P. 437–445.
31. Tait A.B., Hall D.K., Foster J.L., Armstrong R.L. Utilizing multiple datasets for snow-cover mapping // Rem. Sens. Env. 2000. No. 72. P. 111–126.

The accuracy of snow water equivalent anomalies retrieval from satellite data

L.M. Kitaev¹, V.V. Tikhonov², T.B. Titkova¹

¹*Institute of Geography RAS, Moscow 109017, Russia
E-mail: lkitaev@mail.ru*

²*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru*

The accuracy of snow water equivalent spatial and temporal variations retrieval from satellite data taking into account the variations in near-surface air temperature and precipitation of winter period is discussed. First of all, the analysis was conducted for cases of anomalous snow accumulation. It was performed for the territory of Eurasia in the borders of Russia for the period of 1979–2007. The discrepancies between the reconstructed and real mean multiyear snow water equivalent values reached 17–45%. The reconstructed and real snow water equivalents differed more than twofold in standard deviations. A moderate increase in real snow water equivalent was observed along with a decrease in the corresponding reconstructed values. The largest retrieval errors were typical of areas with high snowpack thickness, forest cover, mountainous relief, considerable multiyear growth of snow water equivalent. The anomalies of the real and reconstructed snow water equivalents were identified and their contributions into the integral variability were calculated. No similarities between the reconstructed and real anomalies were found for the given period. Therefore, real and retrieved from satellite data snow water equivalents have little similarity in value,

spatial and temporal distribution and anomaly manifestation. The retrieval algorithms for satellite data should be improved to take into account the state of surface and snowpack structural characteristics. The dependencies obtained in this work can be used to correct reconstructed snow water equivalent values or fine-tune their calculation procedures.

Keywords: real and reconstructed snow water equivalents, near-surface air temperature, precipitation, multiyear variability, spatial variability, snow water equivalent anomaly

Accepted: 27.01.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-27-39

References

1. Baykov V.A., Bakirov N.K., Yakovlev A.A., Novye podkhody v teorii geostatisticheskogo modelirovaniya (New approaches in the theory of geostatistical modeling), *Vestnik UGAGU*, 2010, Vol. 14, No. 2 (37), pp. 209–215.
2. Volodicheva N.A., Kitaev L.M., Krenke A.N., Oleinikov A.D., Mezhdogovye izmeneniya snezhnosti na Kavkaze i Vostochno-Evropeiskoi ravnine (The interannual changes in snowfall in the Caucasus and the East European Plain), *Sneg i led*, 2004, No. 96, pp. 138–143.
3. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii*, (The second assessment report of Hydromet about climate change and their impact on the territory of the Russian Federation), Moscow: Roshydromet, 2014, 1008 p.
4. Galakhov V.P., *Imitatsionnoe modelirovanie kak metod glyaciologicheskikh rekonstrukcii gornogo oledeneniya* (Imitation simulation as a method of glaciological reconstructions of mountain glaciers), Novosibirsk: Nauka, 2001, 134 p.
5. Galahov V.P., *Usloviya formirovaniya i raschet maksimal'nykh snegozapasov v gorakh* (Conditions of formation and calculation of the maximum snow cover in the mountains), Novosibirsk: Nauka, 2003, 104 p.
6. Gruza G.V., Ran'kova E.Y., Kleshchenko L.K., Smirnov V.D., O prostranstvennom osrednenii v zadachakh monitoringa klimata (About spatial averaging in climate monitoring tasks), *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2013, Volume XXV, pp. 42–71.
7. Zhil'tsova E.L., Anisimov O.A., O tochnosti vosproizvedeniya temperatury i osadkov na terrotorii Rossii global'nymi klimaticheskimi arkhivami (About accuracy of evaluation of temperature and precipitation on the Russian territory through global climate archives), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2009, No. 9, pp. 66–74.
8. Kislov A.V., Kitaev L.M., Konstantinov I.S., Statisticheskaya struktura krupnomasshtabnykh osobennostei polya snezhnogo pokrova (Statistical structure of the large-scale features of the snow cover), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2001, No. 8, pp. 98–104.
9. Kitaev L.M., Krenke A.N., Titkova T.B., Klimaticheskie usloviya predelov narastaniya snegozapasov na severe Evrazii (Climatic conditions of rise limit of the snow storage in the north of Eurasia), *Sneg i led*, 2004, No. 94, pp. 117–126.
10. Kitaev L.M., Trofimova L.B., Komarovskaya E.V., Danilovich I.S., Bil'dyug A.A., Mnogolethaya izmenchivost' osadkov i snezhnogo pokrova Vostochno-Evropeiskoi ravniny (Long-term variability of precipitation and snow cover formation of the East European Plain), *Kriosfera Zemli*, 2010, No. 3, pp. 77–81.
11. Kitaev L.M., Tikhonov V.V., Boyarsky D.A., Titkova T.B., Komarova N.Y., Snezhniy pokrov Vostochno-Evropeiskoi ravniny po dannym mnogochastotnoi mikrovolnovoi sputnikovoi radiomenrii (Snow cover of the East European Plain, according to the multi-frequency microwave satellite radiometry), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemly is kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 249–257.
12. Kitaev L.M., Titkova T.B., Korobov E.D., Izmenchivost' snegonakopleniya i dinamika temperatury pochvy v svyazi s izmeneniyami lokal'noi meteorologicheskoi obstanovki (The variability of snow accumulation and soil temperature dynamics in relation to the local meteorological changes), *Mnogoleynye protsessy v prirodnkh kompleksakh zapovednikov Rossii*, Velikine Luki: Velikolukskaya gorodskaya tipografiya, 2012, pp.1–26.
13. Kitaev L.M., Titkova T.B., Izmenchivost' al'bedo snezhnogo pokrova – analiz sputnikovyykh dannykh (The variability of the albedo of snow – the analysis of satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemly is kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2., pp. 47–54.
14. Kopanev I.D., *Snezhniy pokrov na territorii SSSR* (Snow cover over the USSR territory), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 181 p.
15. Kotlyakov V.M., *Snezhnyi pokrov i ledniki Zemli* (Snow cover and land of Earth), Moscow: Nauka, 2004, 448 p.
16. Krenke A.N., Kitaev L.M., Razuvaev V.N., Izmenenie srokov zaleganiya snezhnogo pokrova na territorii byvshego SSSR v tselom i ego regionov v 1966–1995 gg. (Changing the timing of the snow cover on the territory of the former USSR as a whole and its regions in the 1966–1995), *Kriosfera Zemli*, 2000, No. 4. pp. 54–60.
17. Krenke A.N., Kitaev L.M., Titkova T.B., Ocenka izmenenii snegozapasov na territorii Severnoi Evrazii v nachale XXI v. (na osnove model'nykh prognozov zimnikh temperatur i osadkov) (Estimation of snow cover changes in Northern Eurasia at the beginning of the XXI century. (based on model predictions of winter temperatures and precipitation)), *Materialy glatsiologicheskikh issledovaniy*, 2009, Vol. 107, pp. 31–37.
18. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vypusk 3, chast' 1* (Manual for hydrometeorological stations and posts. Issue 3, Part 1), Leningrad: Gidrometizdat, 1985, 299 p.
19. Nosenko O.A., Nosenko G.A., Osobennosti povedeniya radiyarkostnykh temperatur SSM/I v subpolyarnykh regionakh Rossii v techenii zimy 2006/2007gg. (Features of behavior of SSM/I brightness temperature in the subpolar regions of Russia during the winter of 2006/2007), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemly is kosmosa*, 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 160–164.

20. Oleynikov A.D., Volodicheva N.A., Povtoryaemost' mnogosnegnykh zim i lavinnykh katastrof na Bol'shom Kavkaze v XX stoletii (Repeatability snowy winters and avalanche disasters in the Great Caucasus in the twentieth century), *Sneg i led*, 2001, No. 91, pp. 87–94.
21. Popova V.V., Polyakova I.A., Izmeneniya srokov razrusheniya snezhnogo pokrova na severe Evrazii v 1936–2008 gg.: vliyanie global'nogo potepleniya i rol' krupnomasshtabnoi atmosfernoï tsirculyatsii (Changes in the timing of destruction of stable snow cover in northern Eurasia in 1936–2008: the impact of global warming and the role of large-scale atmospheric circulation), *Sneg i led*, 2013, Vol. 53, No. 2, pp. 29–39.
22. Rubinstein K.G., Gromov S.S., Zoloeva M.V., Dinamicheskaya klassifikatsiya snegnogo pokrova (Dynamic classification of snow cover), *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2006, Vol. 11, No. 57, pp. 31–37.
23. Telegina A.A., Frolova N.L., Kitaev L.M., Titkova T.B., Otsenka tochnosti sputnikovoi informatsii o snegozapasakh krupnykh vodosborov evropeiskoi territorii Rossii (Evaluation of the accuracy of snow storage satellite data on of large catchment areas in European Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemly is kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 38–49.
24. Trofimova E.B., Otrazhayushchaya sposobnost' snezhnogo pokrova (The reflectivity of the snow cover), *Universitetskii kompleks kak regional'niy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury*, Orenburg: Orenburgskii Gosudarstvennyi Universitet, 2014, pp. 1498–1500.
25. Bjorgo E., Johannessen O la M., Miles M.W., Analysis of merged SMMR-SSM/I time series of Arctic and Antarctic sea ice parameters 1978–1995, *Geophysical Research Letters*, 1997, Vol. 24, No. 4, pp. 413–416.
26. Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., The Influence of Stratigraphy on Microwave Radiation from Natural Snow Cover, *J. of Electromagnetic Waves and Applications*, 2000, Vol. 14, No. 9, pp. 1265–1285.
27. Brown R.D., Mote P.W., The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing Climate, *Journ. of Climate*, 2009, Vol. 22, No. 8, pp. 2124–2145.
28. Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Vinnikov K.Y., 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability, *Geophysical research letters*, 1990, Vol. 17, No. 18, pp. 124–139. DOI: 10.1029/1993GL018031, 2003.
29. 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, 124 p.
30. Kitaev L., Krenke A., Konstantinov I., Kislov A., Razuvaev V., Martuganov R., The snow cover characteristics of Northern Eurasia and their relationship to climatic parameters, *Boreal Environment Research*, 2002, Vol. 7, No. 4, pp. 437–445.
31. Tait A.B., Hall D.K., Foster J.L., Armstrong R.L., Utilizing multiple datasets for snow-cover mapping, *Rem.Sens. Env.*, 2000, No. 72, pp. 111–126.