

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВЫСОТЫ СВЕЖЕВЫПАВШЕГО СНЕГА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ПОСТПРОЦЕССИНГА СИСТЕМ АТМОСФЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ COSMO)

Е.В. Казакова, М.М. Чумаков, И.А. Розинкина

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
Inna@metcom.ru*

Введение

С повышением точности численных прогнозов погоды повышаются и требования, предъявляемые как к их успешности, так и составу вычисляемых величин. Одной из актуальных задач в настоящее время является прогнозирование характеристик снежного покрова в рамках численного моделирования атмосферных процессов высокого (мезомасштабного) разрешения.

В свою очередь данная задача имеет целый ряд аспектов. Одному из них – получить численный прогноз не только значений накопленной за заданные интервалы времени массы снежных осадков (т.е. массы выпавшей воды, что традиционно вычисляется в моделях атмосферы), но и оценить высоту свежеснеговывпавшего снега – посвящена данная работа.

Оценки высоты слоя свежего снега после снегопадов требуются при решении широкого спектра важнейших задач коммунальных, автодорожных служб, железнодорожного транспорта, эксплуатации электросетей, планирования проведения соревнований по зимним видам спорта и т.д.

Плотность свежеснеговывпавшего снега не является переменной модели, поэтому для решения данной задачи требуется предложить и протестировать экономичный алгоритм ее расчета в зависимости от вычисляемых моделью величин. Далее предполагается включить этот алгоритм в так называемый блок постпроцессинговой обработки выходной модельной продукции. Отметим, что плотность свежеснеговывпавшего снега может меняться в очень широких пределах, в первую очередь в зависимости от температурного режима. При положительных температурах приземного воздуха разброс ее значений максимален. Также следует учесть, что в данной постановке задачи речь идет об описании сравнительно быстрых (несколько часов) изменений высоты снега, которая в последующий период (оцениваемом в сутки) может уменьшиться ввиду его проседания и уплотнения. Этот факт несколько усложняет

проверку результатов в силу недостаточной дискретности по времени (1 сутки) выполняемых стандартных сетевых метеорологических наблюдений.

В данной работе удалось не только предложить, реализовать и протестировать предложенный алгоритм по данным наблюдений, но выполнить ряд расчетов на основе формируемых моделью COSMO-Ru [4] выходных полей и обсудить успешность применения данного алгоритма в технологиях мезомасштабного моделирования.

В частности, в свете проведения Олимпийских игр в Сочи такого рода информация была бы крайне полезна для прогнозирования возможности проведения соревнований по различным видам спорта.

Цели и задачи исследования

В течение всего периода существования снежного покрова его плотность претерпевает изменения, которые обусловлены различными факторами: давлением вышележащих слоев снега на нижележащие, процессами метаморфизма, оттепелями и связанными с ними процессами фазовых переходов и перемещения талой воды, воздействием ветра, рельефом местности, влиянием растительности, фазовым составом выпадающих осадков. Во многих моделях атмосферы для расчета дальнейшей эволюции снежного покрова необходима информация о плотности свежесвыпавшего снега. Часто за величину плотности свежесвыпавшего снега берется ее среднее значение – 100 кг/м^3 (например, в моделях BATS, SPONSOR, BASE [11]). По всей видимости, для задач климата такое допущение приемлемо, так как в этих задачах, в отличие от задач прогноза погоды, не требуется оценок прироста высоты снега в первые часы его залегания.

Однако из экспериментальных данных известно, что плотность снега может изменяться от 10 кг/м^3 (свежесвыпавший крупнозвездчатый снег в безветренную погоду) до 700 кг/м^3 (сильно промокший и смёрзшийся снег) [3]. В [1] отмечено, что плотность свежесвыпавшего сухого снега составляет $30\text{--}100 \text{ кг/м}^3$, мокрого снега – до 200 кг/м^3 , мокрого снега, выпадающего с дождем, – до 300 кг/м^3 .

В [2] указывается, что начальное состояние отложенного снега зависит от определенной комбинации ветровых условий и типа кристалла в момент его выпадения. Можно выделить два крайних случая с экстремальными значениями плотности свежего снега. Первый случай создают агрегаты или дендритовые кристаллы, отложенные в штилевую погоду и образующие очень пористый слой снега с объемной плотностью около 10 кг/м^3 . Вторым случаем являются однородные агрегаты или замерзшие капли воды и крупа, способные

образовать слой снега с объемной плотностью до 500 кг/м^3 , в особенности если они переотложены приповерхностными ветрами непосредственно после момента отложения.

Таким образом, изменения плотности свежевывавшего снега зависят как от метеорологических условий выпадения снега (приземных температуры воздуха, скорости ветра), так и от структуры и размера (эффективного радиуса) выпадающих снежных кристаллов. Чем больше эффективный радиус снежных кристаллов, тем рыхлее они ложатся, и, соответственно, меньше плотность свежевывавшего снега. Аналогичная зависимость наблюдается в случае выпадения снега в виде снежных агрегатов. Эти характеристики во многом определяются метеорологическими условиями в слое формирования кристаллов, т.е. на высоте 2–5 км. При расчете плотности свежевывавшего снега в горных условиях следует учитывать, что особенности микроклиматических условий, главным образом определяемые высотой и экспозицией склона, также оказывают дополнительное влияние на значения плотности свежего снега [8, 9].

При практическом прогнозировании высоты снега после снегопадов часто используются простые зависимости (так, плотность выпадающего снега принимается равной 100 кг/м^3), однако они дают приблизительные оценки, и в условиях, близких к 0°C , могут в несколько раз исказить результат.

Система мезомасштабного моделирования COSMO-Ru, которая используется в синоптической практике Росгидромета с 2011 г. в качестве основного средства мезомасштабного численного прогноза [4], вычисляет большое количество полей гидрометеорологических элементов. Многие из них формируют массивы выходной продукции модели. Однако среди характеристик «снежных» осадков в массивах выходной продукции присутствуют только значения их водного эквивалента, т.е. массы выпавшей воды, накопленной за заданные интервалы времени. При этом в части модели атмосферы, производящей комплекс вычислений для процессов, происходящих на подстилающей поверхности – блоке подстилающей поверхности TERRA, – производится расчет плотности свежевывавшего снега, но вычисляемые значения являются промежуточными, не «запоминаются» и далее не выводятся в массивах выходных полей. Одной из задач данной работы было проверить, насколько хорошо работают предложенные в TERRA данные параметризации и можно ли использовать эти встроенные алгоритмы для оценок свежевывавшего снега при постпроцессинговой обработке результатов вычислений модели, либо требуется их усовершенствование.

Помимо этого в синоптической практике регулярно производится некоторая субъективная и объективная коррекция результатов моделирования, т.е. по имеющейся

информации о систематических расхождениях вычисленных моделью и наблюдаемых величинах метеопараметров или характеристиках погодного процесса синоптик сам вырабатывает экспертный прогноз, суммы осадков в котором могут полностью не соответствовать вычисленным моделью значениям. В этом случае для определения высоты требуются независимые алгоритмы пересчета сумм твердых осадков в высоту снега.

Таким образом, была поставлена задача – проверить эффективность существующего и при необходимости разработать усовершенствованный алгоритм для вычисления плотности и высоты свежеснегавшего снега, базирующийся на зависимостях между ними и вычисляемыми моделью и измеряемыми в рамках стандартных метеонаблюдений метеорологическими величинами. Необходимым требованием была также экономичность алгоритма.

Описание методов исследования

Основная цель данной работы – предложить и протестировать алгоритм определения прироста снега по имеющимся значениям выпавших сумм осадков – может быть достижима при наличии соответствующих данных метеорологических наблюдений.

При выполнении данной работы были проанализированы различные способы вычисления плотности свежего снега в зависимости от температуры воздуха.

Были рассмотрены следующие алгоритмы:

1. Алгоритм, используемый в блоке описания процессов на подстилающей поверхности TERRA в рамках мезомасштабной модели атмосферы COSMO [7] в зависимости от температуры в приповерхностном слое:

$$\rho_{snow, fresh} = \rho_{s, f, min} + (\rho_{s, f, max} - \rho_{s, f, min}) \frac{T_{low} - T_{min}}{T_0 - T_{min}}, \quad (1)$$

где $\rho_{s, f, min} = 50 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{s, f, max} = 150 \text{ кг/м}^3$; точка заморзания $T_0 = 273,16 \text{ К}$; $T_{min} = 258,15 \text{ К}$; T_{low} – температура самого нижнего модельного уровня атмосферы. Таким образом, диапазон изменения плотности свежеснегавшего снега находится в пределах от 50 до 150 кг/м³.

Внутри блока TERRA плотность свежеснегавшего снега рассчитывается на каждом временном шаге. Плотность всего слоя снежного покрова, которая является прогностической переменной в модели COSMO, также считается на каждом временном шаге и функционально зависит от плотности свежеснегавшего снега. Кроме того, при вычислении результирующей плотности снежного покрова учитывается процесс старения снега введением специальных

функций, зависящих от температуры снега и двух констант: температуры замерзания воды (0 °С) и эмпирически подобранной минимальной температуры (–15 °С).

2. Алгоритмы вычисления плотности свежеснегавшего снега в зависимости от температуры слоев воздуха, где происходит формирование частиц твердых выпадающих осадков, предложенные в ряде работ (например, [6, 10]).

В [10] приводится уравнение, линейно связывающее плотность с температурой на высоте 700 гПа:

$$\rho = 14,9 + 0,96T_{700}, \quad (2)$$

где ρ – плотность свежеснегавшего снега (в %, т.е., например, 12 % соответствуют плотности 120 кг/м³); T_{700} – температура на поверхности 700 гПа (°С).

3. Реализованный и предложенный авторами статьи алгоритм, базирующийся на зависимостях, полученных канадскими специалистами на основе большого количества измерений [5] (параметризация для модели подстилающей поверхности CLASS). Входными параметрами для данного алгоритма являются суммы осадков за несколько часов и осредненная за этот же период приземная температура воздуха, полученные из стандартных метеорологических станционных наблюдений. Авторами было установлено, что зависимость плотности свежеснегавшего снега, предложенная в [5], может быть использована для расчетов характеристик свежего снега для небольшого периода снегонакопления (до 12 часов) и в случае выпадения небольших сумм осадков в виде снега:

$$\rho_{s,f} = 67,92 + 51,25e^{\frac{T_a}{2,59}}, T_a \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \rho_{s,f} = \min(200, 119,2 + 20T_a), T_a > 0 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

В формуле (3) приняты следующие обозначения: $\rho_{s,f}$ – плотность свежеснегавшего снега, кг/м³; T_a – температура воздуха, °С.

В том случае, если выпадает большое количество снега (например, в горах) или в случае расчетов характеристик свежеснегавшего снега для продолжительного временного периода (одни сутки), авторами было предложено дополнительно учитывать явление упругой деформации, которое испытывает слой выпавшего снега, на основе [12]. Так, в [12] в результате обработки большого числа натуральных данных было выделено два интервала температур с измененными зависимостями значений модуля Юнга снега E (Па) от плотности снега ρ (кг/м³): от –1 до –5 °С и от –5 до –13 °С. Так как в природе снег может наблюдаться и при положительных температурах воздуха (например, в случае оттепели), авторами данной

статьи было предложено расширить предлагаемый диапазон температур, при котором наблюдаются полученные зависимости. В этом случае формулы запишутся в виде:

$$E_1 = (0,0167\rho - 1,86) \cdot 10^6, T > -5 \text{ }^\circ\text{C}; \quad E_2 = (0,059\rho - 10,8) \cdot 10^6, T \leq -5 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (4)$$

где E_1, E_2 – модуль Юнга снега для двух температурных интервалов (Па); ρ – плотность снега ($\text{кг}/\text{м}^3$); T – приземная температура воздуха ($^\circ\text{C}$).

Слой свежеснежавшего снега может быть представлен в виде набора подслоев, находящихся между собой в термическом и механическом взаимодействии. Количество подслоев зависит от величины сумм выпадающих осадков. Высота подслоев задается параметрически. В данной задаче она была принята равной 1 см.

Считая, что каждый последующий подслоя снега испытывает давление вышележащих слоев, формулы, полученные на основе формул (4) и из определения модуля упругости (Юнга), для плотности каждого подслоя примут вид:

$$\rho = \frac{\left(\frac{mg}{10^6(1-\sigma)} + 1,86\right)}{0,0167}, T > -5 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \rho = \frac{\left(\frac{mg}{10^6(1-\sigma)} + 10,8\right)}{0,059}, T \leq -5 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (5)$$

где $m = H \cdot (\rho_1 + \rho_2 + \dots)$; $H = 0,01$ м; g – ускорение свободного падения; σ – эмпирический параметр, отвечающий за напряжение при остаточной деформации; $\sigma \leq 0,02$, поскольку в теории упругости материалов полагается, что если деформации превышают 2 %, то начинается пластическая деформация материала, а не упругая. Основным предположением при разработке данного алгоритма является положение о квазистатическом равновесии снежного покрова, когда снег уже не испытывает «проседания» и уплотнения, и имеют место только упругие деформации.

Несложно видеть, что, согласно данному приближению, выделяются два интервала квазипостоянных значений плотностей: приблизительно $111 \text{ кг}/\text{м}^3$ для «теплого случая» и $183 \text{ кг}/\text{м}^3$ – для низких температур. Сравнив с (1)–(3), обобщившими эмпирические данные для свежеснежавшего снега, приходим к противоречию: существенно более «рыхлым» является снег, выпадавший при более высоких температурах воздуха. Поэтому, чтобы учесть оба эффекта – упругого уплотнения и типа выпадающих осадков, авторы заменили константы для характерных значений плотностей в (5) для двух выделенных температурных интервалов в соответствии с (3), получив следующие зависимости для определения плотности снега для каждого из выделенных подслоев:

$$\rho = \frac{mg}{10^6 \cdot (1-\sigma) \cdot 0,0167} + \rho_{s,f}, T > -5 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \rho = \frac{mg}{10^6 \cdot (1-\sigma) \cdot 0,059} + \rho_{s,f}, T \leq -5 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (6)$$

Плотность самого верхнего подслоя определяется только зависимостью от температуры воздуха (3), дальнейшее увеличение плотности в слое снега и ее расчет происходят с учетом вычисленного значения первого подслоя. Такое приближение позволяет более аккуратно рассчитывать плотности подслоев и получать более правильные средние характеристики для всего слоя свежеснеговывпавшего снега.

Как следует из формул, при оценках количества выпавшего снега за реально возможные снегопады в течение суток эффект влияния упругой деформации может проявиться только в 3–4 знаке, по сравнению с «базовой» формулой (3).

Для пересчета плотности снега в его высоту использовалась зависимость:

$$h_{s,f} = \frac{p_s \cdot \rho_w}{\rho_{s,f}},$$

где $h_{s,f}$ – высота свежеснеговывпавшего снега (мм); p_s – сумма осадков (мм); $\rho_w = 1000$ кг/м³ – плотность воды.

Используемые материалы

Задача определения таких характеристик снежного покрова, как его водный эквивалент и плотность, осложняется тем, что регулярные измерения проводятся на достаточно редкой измерительной сети и с большими промежутками по времени (например, на гидрологических постах производят измерения водного эквивалента снега раз в 10 дней в период его существования, а в условиях таяния – раз в 5 дней). При этом высота снега измеряется ежедневно и является элементом стандартных синоптических измерений.

Однако использование информации сетевых синоптических измерений в полной мере не является корректным для задачи определения высоты свежего снега, поскольку эти данные включают в себя значения высоты снега, измеренные один раз в сутки, но не прирост после снегопадов (в этом случае период снегопада может быть не только «разбит» этим фиксированным сроком измерений, но и за этот период выпавший снег может уплотниться и частично растаять). Поэтому особую ценность имеют проводимые серии специальных наблюдений, либо датчики квазинепрерывных измерений на некоторых автоматических метеорологических станциях (АМС). Их эксплуатация, требующая выполнения жестких требований к состоянию датчиков оценок характеристик снега, представляет некоторую технологическую проблему, что сказывается на качестве и доверии к измеренным величинам.

Метеорологическое обеспечение игр зимней Олимпиады включает в себя оценку плотности и высоты снега, а также прогнозы его прироста в результате прошедших снегопадов. С этой целью в районе проведения игр зимней Олимпиады в районе Красной Поляны с 2011 г. проводятся серии учащенных снегомерных съемок, главная цель которых – оценка лавинной опасности. Однако часть измерений, пригодных для использования в качестве тестовых данных для оценки работы различных алгоритмов, проводится на горизонтальных поверхностях.

Ценность этих данных ручных измерений усиливается тем фактором, что в районе Красной Поляны выпадение снега может происходить при широком интервале температурных условий, следовательно, можно выполнить тестирование алгоритмов также для широкого диапазона температур.

Именно использование таких данных наблюдений, проводимых в Сочинском районе специалистами по лавинной безопасности на станции Горная Карусель (1500 м над уровнем моря), выполненных в период января 2013 г. для ряда снегопадов, легло в основу данной работы. Помимо этого была проанализирована работа алгоритмов для оценки высоты свежего снега в результате сильного снегопада в Москве и Подмосковье в период 3–4 февраля 2013 г. по данным синоптических наблюдений в Московском регионе.

Обсуждение результатов

Чтобы проверить, насколько правильно воспроизводятся изложенными выше алгоритмами характеристики выпадающего снега, авторами были выполнены расчеты по этим алгоритмам.

Так, вначале были построены зависимости от температуры плотности снега по трем рассмотренным формулировкам (рис. 1).

Как видно, основные различия между параметризациями находятся в интервале от 0 до -8°C , а также при температурах воздуха свыше $+2^{\circ}\text{C}$. Если случаи с положительными температурами относительно редки (хотя для ситуации горного кластера Сочи-2014 с такими ситуациями приходится сталкиваться относительно часто), то подавляющее число ситуаций умеренного климатического пояса приходится как раз на существенные различия в результатах вычислений. Также следует отметить ограниченность применения формулы (2), полученной на основе линейно-регрессионных подходов (по всей видимости, полученных для ограниченного диапазона исследуемых температурных интервалов заданного климатического региона).

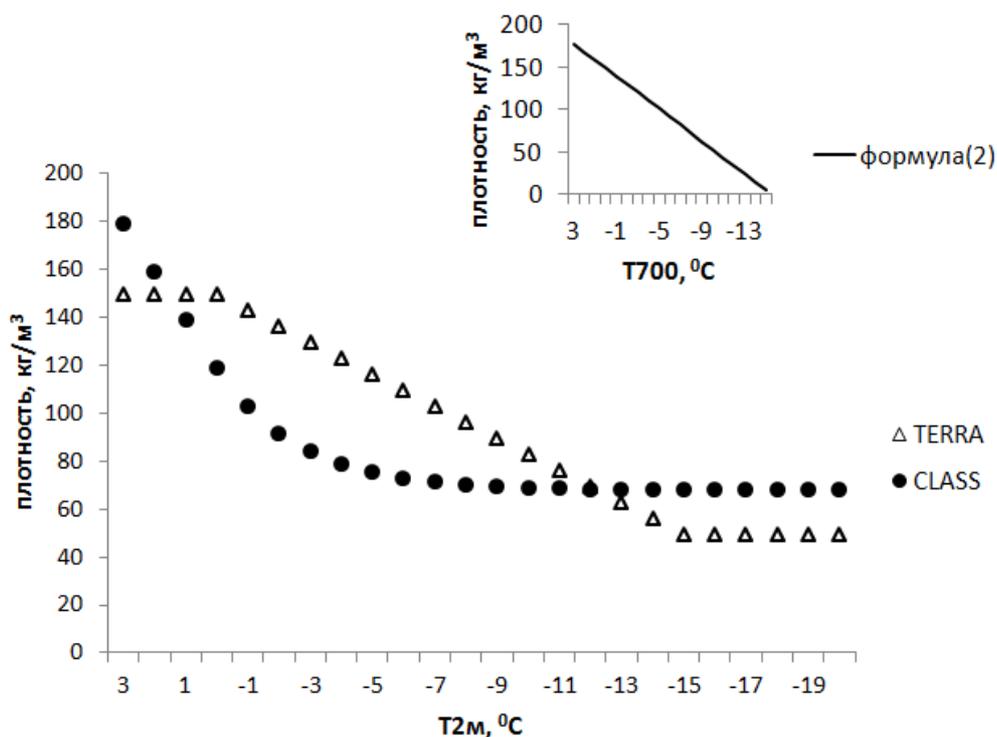


Рис. 1. Плотность свежеснеговывающего снега ($\text{кг}/\text{м}^3$) в зависимости от температуры воздуха по результатам вычислений по различным алгоритмам.

Следующим этапом анализа были вычисления по различным алгоритмам для конкретных снегопадов и сопоставление результатов с данными измерений на станции Горная Карусель. Результаты представлены на рис. 2.

Помимо рассмотренных в предыдущем разделе трех основных зависимостей, включая предложенный алгоритм (6), для сравнения были также произведены дополнительные расчеты с использованием распространенного подхода – постоянной плотности $100 \text{ кг}/\text{м}^3$. Кроме того была рассчитана высота свежеснеговывающего снега на основе предложенного алгоритма, но с использованием не только приземной температуры, но и температуры на уровнях 850 и 700 гПа. Как следует из табл. 1 и рис. 2, предложенный алгоритм дает неплохое приближение к измеренным на станции значениям: среднеквадратическая ошибка значений высоты свежеснеговывающего снега в случае использования алгоритма составляет 1,1 см при средней абсолютной ошибке 2,9 см, а относительная ошибка составляет 8,3 %; значения тех же ошибок в случае использования предложенного алгоритма с применением температуры на уровне 850 гПа – 0,7 см, 1,5 см и 6,4 % соответственно; предложенного алгоритма с применением температуры на уровне 700 гПа – 1,9 см, 4,4 см и 14,6 %; формулы (1) в блоке TERRA модели COSMO-Ru – 2 см, 6,2 см и 15,6 %; зависимости, применяемые в синоптической практике – 1,6 см, 4,3 см и 12,2 %; формулы (2) – 7,6 см, 16,5 см и 57,4 %

соответственно. Отметим, что близкие значения результатов при использовании в (6) приземной температуры и T850 во многом объясняются высотой данной станции измерений. Тем не менее при отрицательных температурах в большинстве случаев предпочтительней оказалось использование температуры, приведенной к 850 гПа, чем данных измерений на станции, находящейся в более «теплых» приземных условиях. Однако применение температуры для более высоких слоев (700 гПа) в большинстве случаев дало худшие результаты. При этом во всех случаях использование предложенного алгоритма показывало существенно более реалистичные результаты, чем использование переводного коэффициента 100 кг/м^3 , а также параметрической функции из блока TERRA, не говоря о линейной зависимости (2).

Как следует из рисунка и таблицы, имеет место некоторое занижение значений прироста снега при использовании в предлагаемом алгоритме зависимостей от приземной температуры воздуха, по сравнению с использованием температуры на уровне 850 гПа. Однако в случае положительных температур лучше использовать приземные значения (выпавший снег при положительных температурах у поверхности земли не сохраняет свою структуру и подтаивает).

Следует иметь в виду, что поскольку использовались данные осадков за 12-часовой интервал, равно как и среднее значение температуры воздуха за этот же период, быстрые изменения параметров были сглажены таким осреднением. Авторы считают, что при наличии данных с более высокой дискретностью по времени алгоритм способен дать более близкие к реальности значения. Например, в случае выпадения крупы при положительных температурах по расчетам, выполненным с помощью алгоритма, получились завышенные значения высоты, по сравнению с наблюдениями (24 января). В этот день снег начал выпадать при температуре $+3,5 \text{ }^\circ\text{C}$, однако из-за необходимости использовать осредненные значения результирующая температура получилась $+1,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Температурные изменения составили за 8 часов от $+3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+0,4 \text{ }^\circ\text{C}$. За этот 8-часовой период довольно сложно оценить, в какой промежуток времени и при какой температуре выпало больше всего осадков. Также вероятно, что при существенно положительных температурах приземного воздуха (свыше $+1 \text{ }^\circ\text{C}$) в предложенный алгоритм следует внести коррекцию для отражения эффектов «проседания» снега за счет его таяния.

Работа предложенного алгоритма была также проанализирована для случая сильного снегопада в Центральном федеральном округе с использованием метеостанций Московского региона и сводок дорожных служб г. Москвы 3–4 февраля 2013 года (табл. 2). Сравнение проводилось со стационарными данными и прогностическими полями мезомасштабной

модели COSMO-Ru с шагом сетки 7 км, работающей в Гидрометцентре России в оперативном режиме. Приземная температура воздуха получалась 12-часовым осреднением значений в основные синоптические сроки, суммы осадков также брались за интервал 12 часов (в 06 и 18 ч ВСВ).

Таблица 2

Температура воздуха и суммы осадков, измеренные на станции ВВЦ Москва и рассчитанные моделью COSMO-Ru; плотность выпавшего снега, вычисленная с помощью алгоритма в сравнении с используемой параметризацией в TERRA, для случая снегопада 3–4 февраля

2013 года

Дата, срок (ВСВ)	Приземная температура, °С		12-часовые суммы осадков, мм			Плотность снега, кг/м ³		
	Измерения	Прогноз на 24 ч COSMO-Ru07	Измерения	Прогноз COSMO-Ru07, дождь	Прогноз COSMO-Ru07, снег	Алгоритм на основе данных наблюдений температуры	Алгоритм на основе прогноза температуры COSMO-Ru07	Параметризация TERRA на основе прогноза температуры COSMO-Ru07
03.02.2013 18 ч	0,8	0,0	5,0	0,23	5,02	135,2	117,9	149,6
04.02.2013, 06 ч	0,7	0,0	2,0	0,07	7,51	132,7	117,8	149,5
04.02.2013, 18 ч	-1,9	-2,0	16,0	0,00	6,02	92,3	90,8	136,1
05.02.2013, 06 ч	-5,4	-7,7	2,0	0,00	0,31	74,4	70,6	98,9
			Сумма осадков за весь период, мм					
			25,0	19,16				

Как видно из табл. 2, рассчитанные по модели COSMO-Ru07 прогностические суммы осадков получились несколько заниженными по сравнению с данными наблюдений (19, 2 и 25 мм соответственно). По данным измерений на метеостанциях, высота снежного покрова с 3 по 5 февраля 2013 года изменилась с 44 до 57 см, то есть всего на 13 см. С помощью предложенного алгоритма на основе пересчета данных измерений 12-часовых сумм осадков в величину прироста снега были получены оценки высоты свежего снега в 25,2 см (табл. 3). В то же время, согласно наблюдениям дорожных служб г. Москвы, непосредственно после снегопада прирост снега в Московском регионе составил до 25 см, однако такого рода данные не фиксировались в стандартных сообщениях SYNOP, так как высота снега измеряется и передается в коде SYNOP раз в сутки. В течение указанного периода резко

менялась температура воздуха от +1,2 до -7,1 °С, в соответствии с этим менялся тип выпадающих осадков и происходило изменение выпавших осадков непосредственно на поверхности земли (уплотнение, просачивание образовавшейся воды и последующее ее замерзание). Вполне вероятно, что разработанный алгоритм правильно воспроизвел количество выпавшего снега, используя данные наблюдений, однако в него не включено описание физических процессов, которые бы отражали последующую эволюцию выпавшего снега с учетом его подтаивания.

Если использовать в качестве входных параметров для предложенного алгоритма прогностические значения сумм осадков модели COSMO-Ru07, то получаются следующие значения (табл. 3).

Таблица 3

Рассчитанные с помощью алгоритма значения высоты выпавшего снега по данным измерений на станции ВВЦ Москва 3–4 февраля 2013 года

Дата, срок (ВСВ)	Высота снега, см	
	Алгоритм на основе наблюдаемых сумм осадков	Алгоритм расчета на основе прогноза осадков по COSMO-Ru07
03.02.2013, 18 ч	3,70	4,45
04.02.2013, 06 ч	1,51	6,44
04.02.2013, 18 ч	17,34	6,63
05.02.2013, 06 ч	2,69	0,44
Всего	25,24	17,96

Заключение

В результате выполненной работы предложен и протестирован алгоритм для определения величин прироста свежеснег выпавшего снега, основанный на многослойном представлении, по сведениям (данным прогностического моделирования или данным метеорологических измерений) о значениях сумм осадков за какой-либо интервал времени и температуры воздуха, осредненной за этот же интервал.

Сравнение результатов расчетов на основе предложенного алгоритма с другими формулами расчета плотности и высоты свежеснег выпавшего снега, активно используемых в практике моделирования прогнозирования погоды, показало возможность больших расхождений в вычислениях высоты свежего снега с использованием различных приближений для широкого диапазона значений температуры приземного воздуха от -1 до -8 °С (типичного для снегопадов в зимних условиях умеренно-континентального климата).

В результате тестирования по данным измерений прироста снега после снегопадов для января 2013 г. на станции Горная Карусель (регион Красная Поляна) было выявлено наиболее близкое соответствие рассчитанных и измеренных значений, полученных по предлагаемому алгоритму, по сравнению с другими рассмотренными методами.

В качестве примера апробации предложенного алгоритма были рассмотрены результаты его применения для случая снегопада в Центральном регионе России 3–4 февраля. Было показано, что использование данного алгоритма целесообразно и дает близкие к реальности результаты как с использованием модельных прогностических сумм осадков, так и при пересчете измеренных сумм в высоту снежного покрова.

В дальнейшем предполагается включить этот алгоритм в блок постпроцессинговой обработки выходной продукции модели COSMO-Ru, а также предложить использовать табулированные значения расчетов высоты свежего снега, рассчитанные по данному алгоритму, при составлении оперативных прогнозов погоды по спортивным объектам горного кластера региона Красная Поляна зимней Олимпиады Сочи-2014

В дальнейшем предполагается вести дальнейшее усовершенствование алгоритма для случаев выпадения снега при положительных значениях температуры приземного воздуха.

Список использованных источников

1. *Войтковский К.Ф.* Механические свойства снега. – М.: Наука, 1977. – 126 с.
2. *Динамика масс снега и льда.* – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 456 с.
3. *Кузьмин П.П.* Физические свойства снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 178 с.
4. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В.* Мезомасштабная модель COSMO-RU7 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник № 39. – 2012. – С. 15–48.
5. *Bartlett P.A, MacKay M.D., Verseghy D.L.* Modified Snow Algorithms in the Canadian Land Surface Scheme: Model Runs and Sensitivity Analysis at Three Boreal Forest Stands // Canadian Meteorological and Oceanographic Society. Atmosphere-Ocean. – 2006. – Vol. 43, No 3. – P. 207–222.
6. *Diamond M., Lowry W.* Correlation of density of new snow with 700-millibar temperature // Journal of Meteorology. – 1954. – Vol. 11. – P. 512–513.
7. *Doms et al.* A description of the Nonhydrostatic Regional COSMO Model. Part 2: Physical parameterization. – 2011. – 154 p. – <http://www.cosmo-model.org>
8. *Grant L.O., Rhea J.O.* Elevation and meteorological controls on the density of new snow // Proc. Advanced Concepts Tech. Study Snow Ice Resources Interdisciplinary Symp., National Academy of Sciences, 1974. – P. 169–181.

9. *Judson A., Doesken N.* Density of freshly fallen snow in the Central Rocky Mountains // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2000. – Vol. 81, No.7. – P. 1577–1587.

10. *McGurk B., Azuma D., Kattelmann R.* Density of new snow in the Central Sierra Nevada // Proc. 56th Annual Meeting, Kalispell, MT, Western Snow Conference, 1988. – P. 158–161.

11. *Slater et al .* The Representation of Snow in Land Surface Schemes: Results from PILPS 2(d) // Journal of Hydrometeorology. – Vol. 2. – February 2001. – P. 7–25.

12. *Yosida Z., Huzioka T.* Some Studies of the Mechanical Properties of Snow // IAHS Red Book Series. Publ. – 1954. – No 39. – P. 98–105.

Поступила в редакцию 31.10.2013 г.

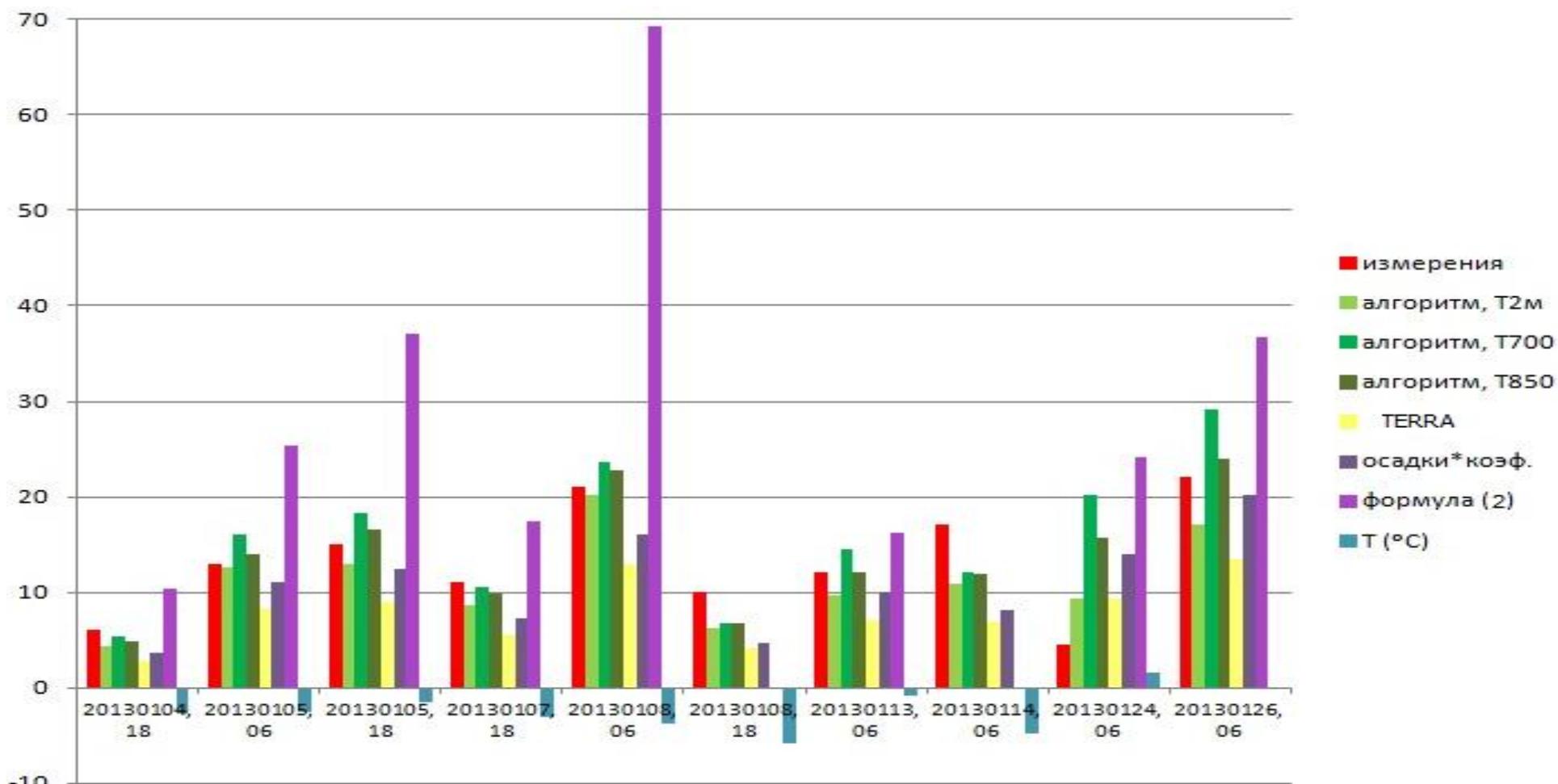


Рис. 2. Высота свежеснегавшего снега (см): по измерениям на станции Горная Карусель, по расчетам, используемым в схеме параметризации TERRA-COSMO, при принятии значения постоянной плотности 100 кг/м^3 , линейной зависимости (формула 2), по разработанному алгоритму (6) с использованием приземной температуры, температуры на уровне 850 гПа, 700 гПа; синим цветом показаны значения приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$).

Таблица 1

Данные измерений приземной температуры, сумм осадков и прироста снега на станции Горная Карусель (январь 2013 г.) и рассчитанные значения высоты выпавшего снега по (3)-(5) «предложенный алгоритм» с использованием значений T_{2м}, T₈₅₀, T₇₀₀, по (1) «зависимость из TERRA», по (2) и при предположении о постоянной плотности 100 кг/м³

Дата, срок (BCB)	T _{2м} , °C	T ₇₀₀ , °C	T ₈₅₀ , °C	Осадки, мм (за сколько часов)	Высота выпавшего снега, см						
					Измерения	Предложенный алгоритм			TERRA	при Rho=100 кг/м ³	Формула (2)
						T _{2м}	T ₇₀₀	T ₈₅₀			
04.01.2013, 18 ч	-2,7	-11,8	-4,8	3,7 (9)	6	4,3	5,4	4,9	2,8	3,7	10,4
05.01.2013, 06 ч	-2,5	-11,0	-4,0	11,0 (12)	13	12,6	16,0	13,9	8,2	11,0	25,3
05.01.2013, 18 ч	-1,5	-12,0	-4,8	12,5 (12)	15	12,9	18,3	16,5	8,9	12,5	37,0
07.01.2013, 18 ч	-3,1	-11,2	-5,6	7,2 (6)	11	8,7	10,5	9,8	5,6	7,2	17,4
08.01.2013, 06 ч	-3,9	-13,1	-7,3	16,1 (12)	21	20,3	23,6	22,7	12,9	16,1	69,3
08.01.2013, 18 ч	-5,8	-17,2	-11,2	4,6 (12)	10	6,3	6,8	6,7	4,1	4,6	–
13.01.2013, 06 ч	-0,9	-9,0	-3,0	10,1 (12)	12	9,7	14,5	12,0	7,0	10,1	16,1
14.01.2013, 06 ч	-4,8	-16,0	-10,7	8,2 (12)	17	10,8	12	11,9	6,9	8,2	–
24.01.2013, 06 ч	1,6	-9,5	-2,3	14,0 (8)	4,5	9,3	20,2	15,7	9,3	14,0	24,2
26.01.2013, 06 ч	0,0	-9,8	-2,9	20,2 (12)	22	17,1	29,2	23,9	13,5	20,2	36,8