

На правах рукописи

Казакова Екатерина Владимировна

**ЕЖЕДНЕВНАЯ ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ И
ОБЪЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО
ПОКРОВА В РАМКАХ СИСТЕМЫ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА
ПОГОДЫ COSMO-RU**

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в ФГБУ «Гидрометцентр России»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Ривин Гдалий Симонович

Официальные оппоненты: **Крупчатников В.Н.,**
доктор физико-математических наук,
директор СибНИГМИ, заведующий
лабораторией информационного
обеспечения численных прогнозов
погоды (ЛИОЧПП)

Насонова О.Н.,
кандидат технических наук,
ведущий научный
сотрудник ИВП РАН

Ведущая организация: ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория
им. А.И. Воейкова»

Защита состоится ... октября 2015 г. на заседании диссертационного совета
Д 327.003.01 при федеральном государственном бюджетном учреждении
"Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской
Федерации" (ФГБУ "Гидрометцентр России") по адресу: г. Москва, Большой
Предтеченский пер., д.11-13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ "Гидрометцентр
России" и на сайте www.meteoinfo.ru.

Автореферат разослан 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор географических наук

Е.С. Нестеров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Снежный покров является одной из важнейших для России компонент гидрометеорологической среды. Знание географического распределения снеготоплив запасов наиболее важно для прогнозирования уровня половодий рек. Помимо этого, детальное прогнозирование даже на 2-3 дня вперед динамики характеристик снежного покрова в течение продолжительного для большинства районов России периода его снеготоплив задержания, связанных со снегопадами, оттепелями и сходом снега, оказывается крайне востребованным при метеорологическом обслуживании целого ряда отраслей экономики: транспорта, строительства, электроэнергетики, коммунальных служб, а также зимних спортивных мероприятий. С точки зрения прогноза погоды учет скорости схода снега в весенний период также является очень важным для прогноза температурного режима территорий, находящихся вблизи границы снежного покрова.

Основой для таких прогнозов в настоящее время является численное моделирование атмосферы, причем с высоким пространственным разрешением (мезомасштабное моделирование). Технологии мезомасштабного моделирования по ограниченным территориям позволяют детализировать расчеты на вычислительных сетках с шагами до 1-2 км.

Для работы модели численного прогноза погоды требуются начальные поля. Переменные модели должны быть заданы в узлах расчетных координатных сеток, и, поскольку прогнозы должны вычисляться оперативно и регулярно, формирование начальных полей также должно производиться в оперативном режиме по данным доступных оперативных метеорологических измерений. Водный эквивалент снега (иными словами, его масса) является также переменной модели атмосферы, поскольку уравнения в моделях атмосферы описывают перенос и преобразование влаги. В настоящее время построены сложнейшие системы усвоения данных о состоянии атмосферы (СУД), работающие на основе комплексного анализа данных наблюдений различных видов: наземных, аэрологических, спутниковых, радарных. При этом производится «состыковка» этих данных с результатами численного прогноза на короткий (на несколько часов) период, т.е. с так называемыми полями первого приближения (ППП), и получение результатов в узлах координатной сетки (процедура объективного анализа (ОА)). Однако для получения начальных значений влажностных характеристик подстилающей поверхности суши (куда входит и масса снежного покрова) задача усвоения данных несколько видоизменяется, т.к. для этих характеристик, в отличие от атмосферных, данные прямых оперативных наблюдений отсутствуют. В случае со снежным покровом измеряемой величиной является высота снега, и в подавляющем большинстве СУД масса снега моделируется самой моделью атмосферы (применяется непрерывное интегрирование схем подстилающей поверхности как части модели атмосферы) с использованием модельных осадков и потоков тепла и/или с использованием простых

параметризаций плотности снега от продолжительности его существования («функции старения»), чтобы пересчитать достаточно надежно измеряемую высоту снега в его водный эквивалент. Такие подходы приводят к накоплению ошибок в течение многих циклов усвоения данных для случаев длительных периодов снегозалегания (типичных для территорий России) в результате неточностей модельных потоков и осадков, а также – используемых при этом алгоритмов параметризаций снежного покрова, работающих в модели атмосферы.

Еще одной особенностью водного эквивалента как переменной модели является тот факт, что изменения данной величины для районов с большой массой снега в течение периода краткосрочного прогноза погоды (до 3-х суток вперед) сравнительно невелики, и успешность ее численного прогнозирования в подавляющем большинстве случаев определяется начальным состоянием. Сложность и многофакторность самой схемы параметризации снега на интервалах интегрирования в несколько дней влияют существенно меньше на успешность прогнозирования его характеристик (массы, температуры, плотности, скорости перемещения границы). Ранее диссертантом было показано, что вблизи границы снежного покрова весной наблюдается резкий рост ошибок численных прогнозов приземной температуры воздуха, что связано с большими ошибками в начальных полях водного эквивалента снега, и, как следствие – скорости перемещения его границы [Kazakova, Rozinkina, 2011].

Таким образом, подготовка для мезомасштабных атмосферных моделей достоверных начальных данных, в том числе водного эквивалента и плотности снежного покрова, является одной из важнейших задач, решение которой позволяет получить как реалистичные оценки снегозапасов, так и повысить точность прогноза основных метеорологических величин, включая прогнозы характеристик снежного покрова.

Естественным путем решения задачи является создание таких систем вычисления водного эквивалента снега, которые по доступным данным измерений воспроизводили бы всю историю его накопления и таяния за весь зимний период, включая уплотнение, оттепели и другие влияющие процессы. В такой технологии желательно использование атмосферного форсинга, основанного на данных измерений, а не на модельных величинах (чтобы не было «накопления» ошибок за длинные снежные периоды интегрирования). Одним из вариантов решения задачи является выполнение расчетов на метеостанциях (т.е. получение локальных значений перед процедурой объективного анализа). Моделирование эволюции снежного покрова в таких задачах должно опираться только на данные, измеряемые оперативной метеорологической наблюдательной сетью. Такой подход стал возможным благодаря современной производительности компьютеров, поскольку требуется ежедневный «обсчет» тысяч метеостанций в пределах зон, покрытых снегом. Затем на основе совмещения рассчитанных значений с полями первого приближения, полученными из СУД, можно построить поля

этих значений для узлов сетки данной величины для всей расчетной области модели атмосферы. Решению именно такой задачи, не реализованной ранее в практике численных технологий Росгидромета, и посвящена диссертация.

Объект исследования – взаимодействие подстилающей поверхности суши с атмосферой. **Предмет исследования** – моделирование эволюции во времени снежного покрова и анализ влияния начальных данных о характеристиках снега на модельные поля метеорологических величин.

Цель исследования – повышение точности начальных полей водного эквивалента снега (ВЭС) для моделей численного прогноза погоды путем разработки системы объективного анализа характеристик снежного покрова на основе моделирования их эволюции в течение периода снегозалегания с использованием данных ежедневных стандартных измерений метеовеличин и высоты снега, учета данных информации ИСЗ о границе снега и нормированных полей первого приближения водного эквивалента снега из систем численного прогноза погоды (ЧПП).

Задачи исследования:

- разработать одномерную модель эволюции во времени плотности слоев снежного покрова, использующую в качестве входных данных только оперативные стандартные метеорологические измерения (код SYNOP) на метеостанциях для применения в оперативных технологиях;
- выполнить тестирование разработанной одномерной модели снега по данным гидрологических наблюдений для различных регионов Европейской территории России (ЕТР);
- разработать технологию объективного анализа характеристик снежного покрова в рамках оперативной системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru;
- выполнить тестирование предложенной технологии локальных расчетов и объективного анализа плотности снега;
- рассмотреть влияние изменений начальных полей снежного покрова на краткосрочные численные прогнозы различных метеорологических величин;
- предложить и апробировать метод вычисления высоты свежесневыпавшего снега как часть постпроцессинга для выпуска дополнительного вида продукции модели COSMO.

Исходные данные:

Данные, необходимые для расчетов плотности и водного эквивалента снега и технологии объективного анализа его характеристик:

- стандартные метеорологические измерения на метеостанциях, переданные в коде SYNOP;
- материалы ИСЗ, размещенные на официальных открытых Интернет-ресурсах: композитные снимки NOAA с разрешением 4 км – на сервере <ftp://140.90.213.161> и композитные снимки MODIS с разрешением 250 м, размещенные на сайте <http://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/rapid-response/modis-subsets>;

- поля первого приближения водного эквивалента и плотности снега оперативной системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru.

Данные для верификации результатов работы предложенной технологии:

- стандартные метеорологические измерения расположенных на Европейской территории России станций, передаваемые в коде SYNOP), за периоды с ноября по апрель 2009-2010, 2011/2012, 2012/2013, 2014/2015 гг.;

- данные снегомерных съемок, с периодичностью 1 раз в 5-10 дней за тот же период;

- данные измерений снеголавинного отряда вблизи станции Горная Карусель для периодов снегопадов в январе 2013 г.;

- измерения автоматических метеорологических станций (АМС) в Северо-Кавказском регионе для февраля-марта 2013 и 2014 гг.,

- прогнозы высоты свежеснегавшего снега, представленные на сайте www.snow-forecast.com, содержащем прогнозы для горнолыжных курортов мира, для февраля-марта 2014 г.

Теоретической основой выполненной работы послужили работы отечественных и зарубежных ученых С.В. Борща, А.И. Воейкова, Е.М. Гусева, В.М. Котлякова, П.П. Кузьмина, Л.С. Кучмента, В.Н. Лыкосова, Е.Е. Мачульской, Ю.Г. Мотовилова, О.Н. Насоновой, Г.Д. Рихтера, К.Ш. Хайруллина, А.Б. Шмакина, R. Pielke, J.W. Pomeroy, A.G. Slater, D.L. Versegny, Z. Yosida и др.

Методика исследования включала в себя:

- систематизацию известных по литературным источникам методов определения характеристик снежного покрова и их сравнительный анализ;

- выявление важнейших физических процессов, определяющих межсуточное изменение характеристик снежного покрова, и их аналитическое описание;

- разработку и реализацию одномерной многослойной модели снега с включением тех процессов, происходящих в снежном покрове, которые могут быть учтены при использовании только данных метеорологических наблюдений международного обмена;

- тестирование и по необходимости – валидацию предложенной одномерной многослойной модели снега;

- предложение и реализацию системы уточнения объективного анализа характеристик снежного покрова в рамках технологии численного прогноза погоды модели атмосферы (на примере COSMO-Ru);

- разработку метода расчета высоты свежеснегавшего снега на основе алгоритмов предложенной модели;

- выполнение численных экспериментов в рамках системы мезомасштабного ЧПП COSMO-Ru и анализ полученных результатов.

Научная новизна:

- впервые в практике оперативного численного прогнозирования России создана технология объективного анализа водного эквивалента и плотности

снега на основе моделирования эволюции их локальных значений в пунктах метеорологических измерений в течение периода снегозалегания, учета данных информации ИСЗ о границе снега и нормированных полей первого приближения водного эквивалента снега из систем ЧПП. Технология реализована в рамках системы численного мезомасштабного прогноза погоды COSMO-Ru, но может использоваться и в других технологиях ЧПП;

- впервые в отечественной гидрометеорологической практике предложена и реализована технология, позволяющая с высокой степенью достоверности, на основе численного моделирования и усвоения данных, производить консультативную ежедневную оценку влагозапасов снега для обширных территорий, не зависящую от их освещенности данными снегомерных съемок;
- предложенный подход построения полей анализа характеристик снега (плотности и водного эквивалента) отличается от традиционно используемых в системах усвоения данных тем, что при моделировании этих характеристик используются исключительно данные оперативных измерений, а не традиционно используемые в СУД модельные осадки и потоки тепла, что исключает накопление ошибок в процессе циклов усвоения данных;
- предложенная одномерная многослойная модель снега отличается экономичностью алгоритма и практически полным отсутствием регионально-зависимых коэффициентов при достаточно хорошей точности получаемых результатов, что делает ее применимой для оперативных вычислений по большому количеству точек метеостанций для получения данных для работы схемы объективного анализа;

Защищаемые положения:

- предложена одномерная многослойная параметрическая модель снежного покрова ММСП, позволяющая рассчитывать значения характеристик снежного покрова по станционным измерениям (код SYNOP) в режиме реального времени;

- предложена и протестирована технология объективного анализа характеристик снежного покрова для моделирования атмосферных процессов на основе результатов модели ММСП, спутниковой информации с высоким пространственным разрешением и полей первого приближения модели атмосферы;

- получены оценки достоверности работы предложенной многоуровневой одномерной модели снега на основе снегомерных съемок, показавшие значимое уточнение значений водного эквивалента снега по сравнению с получаемыми на основе традиционного подхода усвоения данных с непрерывным интегрированием поверхности суши и использования функций старения снега, и соответственное уточнение прогнозов водного эквивалента снега в рамках системы мезомасштабного ЧПП COSMO-Ru;

- показано, что использование предложенной технологии уточнения начальных значений характеристик снега приводит к значимому улучшению

прогнозирования приземной температуры воздуха моделью атмосферы вблизи границы снежного покрова (до 1-6°C);

- предложен и протестирован метод вычисления характеристик свежеснежного покрова, который может быть использован как независимо, так и в постпроцессинге систем ЧПП.

Практическая значимость. Использование получаемых с помощью предложенной методики полей характеристик снежного покрова в качестве начальных данных в мезомасштабной модели атмосферы COSMO-Ru обеспечивает повышение качества выпускаемой прогностической продукции (в первую очередь, водного эквивалента снега и приземной температуры воздуха) за счет использования реалистичных значений характеристик подстилающей поверхности.

Разработанная методика может быть применима для получения начальных данных о характеристиках снежного покрова в технологиях ЧПП.

Результаты расчетов по ММСР для весеннего периода позволяют уточнить данные о накопленных влагозапасах снега для гидрологических задач, особенно в районах с редкой наблюдательной сетью.

На основе разработанного алгоритма вычислений характеристик свежеснежного покрова были составлены таблицы и переданы синоптикам горного кластера Сочи-2014. Реализующая алгоритм программа для ЭВМ была зарегистрирована в РОСПАТЕНТе (Свидетельство №2014618542 от 25.08.2014, [Казакова, Чумаков, Розинкина, 2014]). Предложенный метод включен в систему оперативного постпроцессинга, действующую в ФГБУ «Гидрометцентр России».

Апробация работы. В 2010-2015 гг. результаты исследований докладывались на ежегодных совещаниях международного консорциума по мезомасштабному моделированию COSMO (<http://www.cosmo-model.org/content/tasks/workGroups/wg3b/default.htm>), на семинарах кафедры Метеорологии и климатологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, ФГБУ «Гидрометцентр России» и в Институте географии РАН, а также на Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2010» и «Ломоносов-2012», «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (2013, в качестве соавтора).

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 3 - в изданиях, рекомендованных ВАК. Получено авторское свидетельство о государственной регистрации программного продукта.

Личный вклад в публикациях автор оценивает следующим образом: в работах с большим количеством авторов ([Негидростатическая ..., 2014] и [Система ..., 2015]) диссертант выполнил подбор и предоставил материалы для раздела о моделировании снежного покрова; тезисы на конференциях (4 работы) автором написаны самостоятельно; остальные статьи в соавторстве: выполнение расчетов и отладка модели ММСР проведены совместно с М.М. Чумаковым; выполнение процедур объективного анализа – под

руководством Г.С. Ривина; постановка задачи и выводы сформулированы при участии И.А. Розинкиной и Г.С. Ривина.

Объём и структура работы. Диссертация объёмом 181 страница машинописного текста состоит из введения, четырех глав, заключения и восьми приложений, содержит 114 рисунков и 17 таблиц. Список использованной литературы включает 177 наименований.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю Г.С. Ривину, а также- М.М. Чумакову, И.А. Розинкиной, С.В. Борщу, А.В. Муравьеву, В.В. Копейкину, Ю.В. Алферову, Д.В. Блинову, А.А. Кирсанову, А.Ю. Бундель за помощь и ценные советы при подготовке данной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Моделирование снежного покрова и объективный анализ его характеристик (современное состояние)

В разделах 1 и 2 приводится обзор моделей и параметризаций снежного покрова, в которых основными прогнозируемыми характеристиками снежного покрова являются, как правило, плотность, высота и водный эквивалент.

Для вычисления плотности свежеснежавшего снега, как правило, используется зависимость от температуры воздуха (модели COSMO-Ru [Doms et al., 2011], CLASS [Bartlett, MacKay, Versegny, 2006]) или от температуры смоченного термометра (модель RAMS [Strack, Liston, Pielke, 2004]). Существуют также алгоритмы расчетов в зависимости от температуры воздушных слоев, в которых формируются частицы твердых выпадающих осадков, как например в работе [McGurk, Azuma, Kattelmann, 1988]. В более сложных моделях предусмотрено влияние и скорости ветра на плотность свежеснежавшего снега (например, в модели CROCUS [Vionnet et al., 2012]).

Во многих технологиях ЧПП и климатического атмосферного моделирования изменение плотности лежалого снега вычисляется, с помощью так называемых «функций старения» (например, в моделях BATS [Dickinson, Henderson-Sellers, Kennedy, Wilson, 1986] и COSMO, определяющих плотность снега в зависимости от его «возраста» (на основе температуры воздуха или количества свежеснежавшего снега за длительные интервалы времени).

В последнем параграфе приводится описание процессов в снежном покрове, которое реализовано в блоке параметризаций характеристик подстилающей поверхности мезомасштабной модели COSMO (включая краткое описание многослойной схемы снежного покрова (авторы – Е.Е. Мачульская, В.Н. Лыков), оперативно используемой в ФГБУ «Гидрометцентр России».

В разделе 3 рассмотрены виды измерений характеристик снежного покрова, в том числе – используемые при формировании начальных условий для гидродинамических моделей атмосферы, с перечислением достоинств и недостатков каждого вида информации. Приводятся описания технологий объективного анализа, используемых и развиваемых в различных центрах по атмосферному моделированию.

Глава 2. Многослойная модель снежного покрова ММСП и объективный анализ характеристик снежного покрова на ее основе

В разделе 1 приводится описание предложенной в настоящей работе одномерной параметрической модели ММСП, использующей в качестве входной информации данные стандартных наблюдений на метеостанциях высоты снежного покрова, температуры воздуха, скорости ветра, температуры точки росы, сумм осадков.

В основу реализованной одномерной параметрической модели ММСП положен принцип, согласно которому столб снега представляется в виде набора слоев (будем здесь и далее называть их элементами), находящихся между собой в термическом и механическом взаимодействии. Высота каждого элемента h в рассматриваемой реализации была принята равной 1 см в соответствии с точностью данной характеристики в рамках кода SYNOP. Таким образом, количество элементарных слоев приравнивается к измеренной на станции высоте снежного покрова H (см). Поскольку с течением времени $t_0, t_1, \dots, t_k, \dots, t_K$ («снежного» сезона) высота снега на станции изменяется, будет меняться и количество элементов $N(t_k)$.

Кратко опишем основу алгоритма (см. схему на рис.1). Модель начинает работать с момента, когда измеренная высота снега отлична от нуля.

На каждом шаге по времени (равном 1 суткам) производится определение количества новых элементов в зависимости от изменения высоты снега ΔH : $N(t_k) = N(t_{k-1}) + \Delta N$, где $\Delta N = \Delta H / h$.

Если $\Delta N > 0$ (случай выпадения снега), то плотность выпавших верхних слоев (свежевыпавший снег высотой ΔH) рассчитывается в зависимости от среднесуточной температуры по уравнению, приведенному в работе [Bartlett, MacKay, Verseghe, 2006].

Для «лежалого» снега (за исключением новых «свежевыпавших» слоев) на каждом шаге по времени определяется изменение плотности элементов $\Delta \rho_n(t_k) = \rho_n(t_{k-1}) + \Delta \rho$ (где $n(t_k) = 1, \dots, N(t_k)$ означает порядковый номер элемента), если $\Delta N \neq 0$. Член $\Delta \rho$ содержит информацию об увеличении/уменьшении плотности элемента в зависимости от рассматриваемого случая:

$$\Delta \rho = \rho' + \rho'' + \rho''',$$

где ρ' - случай уплотнения снега за счет новых элементов ($\Delta N > 0$), ρ'' - случай уплотнения снега ввиду сноса снега ветром ($\Delta N < 0$), ρ''' - случай

уплотнения столба за счет проседания снега или таяния (просачивание и замерзание воды) ($\Delta N < 0$).

Если $\Delta N > 0$, то плотность каждого элемента $\rho_n(t_k) = \rho_n(t_k) \left(T_n(t_k), \sum_{m=n(t_k)}^{N(t_k)} \rho_m(t_k) \right)$ является функцией, зависящей от температуры воздуха $T_n(t_k)$ в момент времени t_k , когда выпадал снег, и количества слоев, которые сверху воздействуют на него. Предполагается, что в момент измерения высоты снежного покрова все слои находятся в квазистатическом равновесии, то есть испытывают только упругие деформации под действием силы тяжести. Для определения плотности этих слоев были использованы формулы на основе работы [Yosida, Huzioka, 1954] с учетом эмпирического параметра, отвечающего за изменение размера элемента при остаточной деформации, связанной с давлением вышележащих слоев [Епифанов, Осокин, 2010]).

Очевидно, что в процессе снегонакопления в колонне снега со временем будут выделяться слои – «включения», – имеющие достаточно однородную плотность, которая была определена в зависимости от температуры (то есть можно выделить крупные слои, сформировавшиеся в различных температурных условиях выпадения снега).

Если высота снега за сутки не изменилась и, соответственно, количество элементов ($\Delta N = 0$), то при условии, что осадков не было, плотность и водный эквивалент не меняются; в противном случае каждому элементу добавляется равное количество влаги.

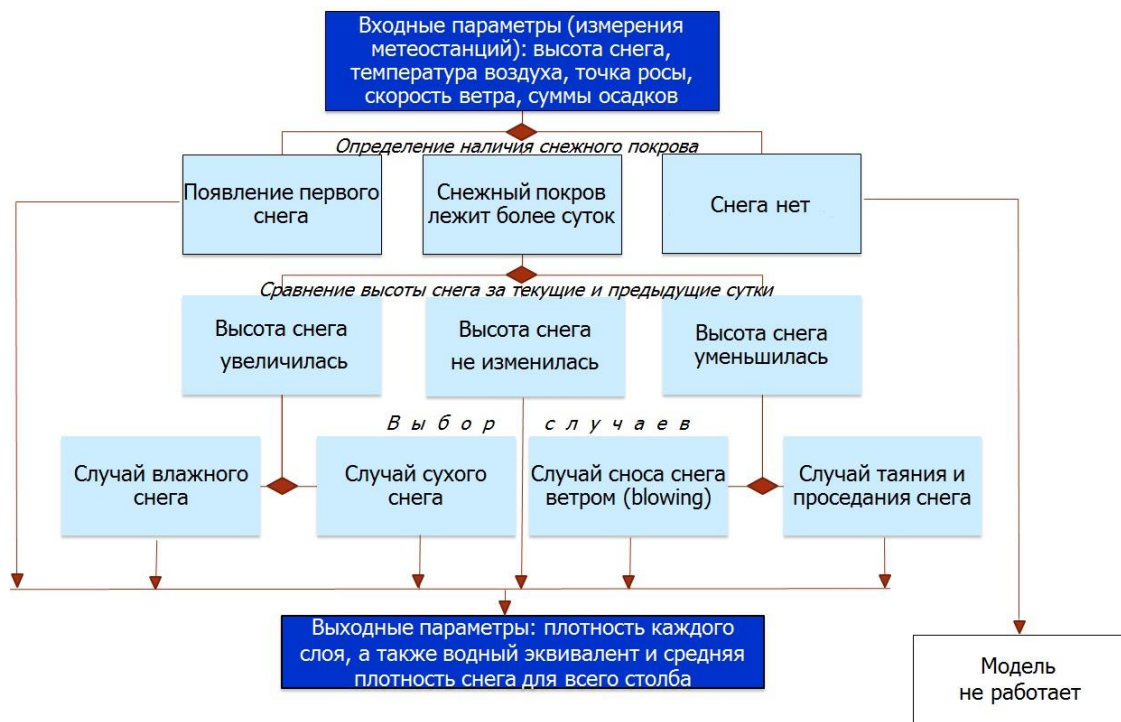


Рис.1. Схема модели ММСП. Темно-синим цветом показаны параметры, используемые в качестве входных и выходных данных

В ММСП предполагается, что уменьшение высоты снежного покрова ($\Delta N < 0$) производится на основе анализа значений измеренных значений метеорологических параметров: таяние происходит при наличии положительных температур в течение суток, снос ветром – при отрицательных температурах в случае существенного уменьшения высоты снега, в остальных случаях предполагается, что имело место уплотнение снега (проседание).

В случае проседания снега производится перераспределение массы по элементам во всех «включениях» путем последовательного исключения слоев с минимальной плотностью с перераспределением их масс по всем слоям до тех пор, пока не будет достигнута высота снежного покрова, измеренная в данный момент времени.

Масса растаявшего снега определяется на основе его изменившейся высоты с определенной ранее плотностью, при этом предполагается, что часть образовавшейся воды удаляется в сток, а часть перераспределяется в толще снега, при этом производится пересчет плотностей каждого из слоев. В случае сноса снега ветром часть снега удаляется также из рассмотрения (хотя это нарушает общую картину баланса массы, однако «приводит» картину моделируемого снега в соответствии с данными измерений). Также на каждом шаге по времени ММСП возможен расчет испарения с поверхности снега, согласно параметризации, предложенной в [Кузьмин, 1961].

Предполагается, что максимальная плотность снега в модели не превышает плотности пористого льда, равной примерно 700 кг/м^3 .

Водный эквивалент снега $SWE(t_k)$ каждый день рассчитывается как сумма плотностей ρ_n всех слоев, а плотность колонны снега $\rho(t_k)$ – как среднее значение плотностей всех слоев:

$$SWE(t_k) = \sum_{n=1}^{N(t_k)} \rho_{n(t_k)}(t_k) \cdot h,$$

$$\rho(t_k) = \frac{1}{N(t_k)} \sum_{n=1}^{N(t_k)} \rho_{n(t_k)}(t_k).$$

Соответствующий код модели ММСП составлен на языке Fortran-90.

В разделе 2 описаны результаты тестирования ММСП на архивах наблюдений по 31 станции Европейской территории России за четыре сезона со снежным покровом: 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012 и 2012-2013 гг. (всего рассмотрено 124 временных ряда значений). Результаты расчетов водного эквивалента снежного покрова, полученных по модели, сравнивались с соответствующими снегомерными данными, проводимыми раз в 10 суток, или в 5 суток – в периоды таяния снежного покрова (рис.2, табл.1).

Статистические характеристики для верификации расчетов были рассчитаны по общепринятым формулам (MRE - средняя относительная ошибка, $RMSE$ - среднеквадратическая ошибка).

Таблица 1. Характеристики успешности расчетов водного эквивалента снега для станций на ЕТР для холодных периодов года в 2009/10, 2010/11, 2011/12, 2012/13 гг.

Номер станции	Название станции	RMSE мм	MRE, %	Номер станции	Название станции	RMSE мм	MRE, %
Центр							
34238	Анна	1,4	23,5	27635	Коломна	1,3	12,0
26298	Бологое	1,5	14,9	27935	Мичуринск	2,4	26,8
28909	Бузулук	1,9	24,7	28409	Можга	3,6	19,0
27242	Буй	2,0	14,4	27848	Моршанск	1,6	17,6
27277	Ветлуга	2,5	26,0	34003	Поныри	2,6	21,4
34202	Готня	1,3	21,3	27972	Радищевое	3,7	19,6
27419	Дмитров	1,9	16,4	27225	Рыбинск	5,3	26,1
27872	Инза	4,7	46,3	33166	Рыльск	1,6	24,2
27901	Карачев	4,6	36,1	26795	Спас-Деменск	1,9	17,7
Средние по региону		2,7	20,4				
Север				Юг			
22778	Верхняя Тойма	2,6	14,2	34958	Благодарный	2,1	70,7
22876	Красноборск	2,1	17,6	34579	Верх. Баскунчак	2,1	48,3
22983	Лальск	3,4	26,6	34363	Камышин	4,4	45,4
22563	Пинега	3,5	23,0	34072	Карабулак	3,6	23,3
Средние по региону		2,9	20,4	37145	Моздок	3,0	28,8
				37212	Нальчик	1,8	43,6
				37144	Прохладная	2,2	30,7
				34356	Фролово	1,6	41,3
				34687	Харабали	1,8	22,5
				Средние по региону		2,3	39,4

На основании сопоставления данных моделирования с данными снегомерных съемок было установлено, что разработанная одномерная многоуровневая модель снежного покрова достоверно воспроизводит эволюцию параметров снежного покрова в течение всего периода его существования (рис.2, табл.1): *RMSE* рассчитанных значений водного эквивалента для станций, расположенных в разных районах ЕТР, составляла от 1,3 до 5,3 мм со средними значениями по регионам от 2,3 мм на юге до 2,9 мм на севере и при относительной ошибке от 15 до 26% для подавляющего большинства станций северных и центральных регионов Европейской части России и от 23 до 45% для большинства станций в пределах Южного и Северо-Кавказского федеральных округов (вне горных районов) с малыми преобладающими значениями высоты снега и неустойчивым снежным покровом.

Как видно из табл. 1, для станций, расположенных на севере и в центре ЕТР, характерны наиболее низкие значения относительных ошибок. Связано это с большими суммами накопленного снега при сравнительно редких оттепелях. Напротив, там, где преобладают малые суммы выпадающего снега

и снежный покров может разрушаться в течение сезона, относительные ошибки вычислений оказались максимальными.

В диссертации показано, что использование значений водного эквивалента по разработанной ММСП позволяет существенно (в отдельных районах – до 200%) уточнить начальные поля модели численного прогноза погоды (рис.3), построенные на основе стандартных подходов усвоения данных и использования функций старения, а также – сами прогнозы данной характеристики.

Разработанная модель позволяет вычислять характеристики снежного покрова ежедневно для каждой станции, где производится стандартный комплекс метеорологических наблюдений (с обязательным ежедневным измерением высоты снежного покрова, а также по синоптическим срокам - температуры, влажности воздуха, скорости ветра и факта осадков).

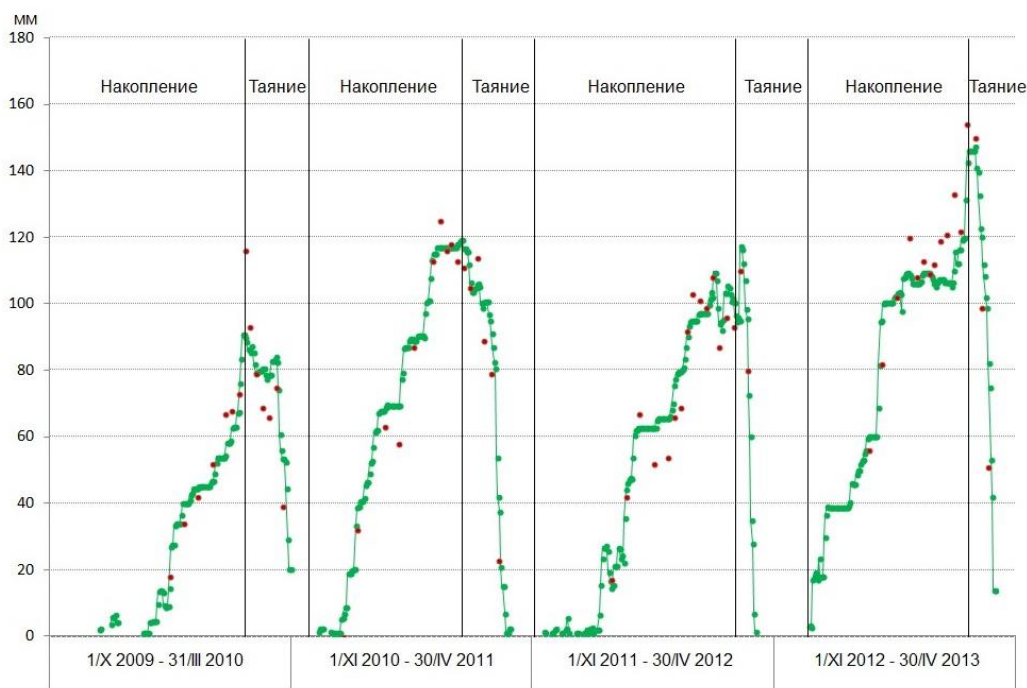


Рис.2. Ход водного эквивалента снежного покрова (мм) в периоды существования снега с 1 октября 2009 по 30 апреля 2013 г. для станции Коломна: зеленым цветом показаны расчеты по ММСП, красные точки – измерения, вертикальными линиями разделены периоды снегонакопления и разрушения снежного покрова

Раздел 3 посвящен описанию реализованной диссертантом процедуры объективного анализа вычисленных ММСП локальных значений характеристик снега в рамках технологии COSMO-Ru. Численные эксперименты проводились на версии оперативной технологии на базе мезомасштабной модели COSMO-Ru с расчетными областями (рис.4): с шагом сетки 7 км (условно назовем ее «Европа») и 2,2 км – области, включающие Центральный федеральный округ и большую часть Северо-Кавказского (условно назовем их «Центральным» и «Северо-Кавказским»

регионами). Процедура построения полей ОА схематически изображена на рис.5.

Общая схема технологии выглядит следующим образом. Для выполнения процедуры объективного анализа требуется регулярное ежедневное обновление значений выходных параметров модели ММСП для совокупности метеостанций, расположенных в пределах области вычислений модели атмосферы. В случае реализованной технологии ежедневные расчеты выполнялись для 2296 станций. При этом для каждой станции выполнялся контроль измерений высоты снежного покрова и исключались возможные нерепрезентативные данные на основе ряда логических критериев.

Далее производилась интерполяция результатов вычислений из точек, где расположены метеостанции, в узлы модельной сетки с помощью триангуляции Делоне, как это выполнено в работе [Копейкин, Алферов, 2011]. Затем производилась дополнительная коррекция границы снежного покрова по данным ИСЗ.

При выполнении данной работы применялись цифровые данные композитных снимков о наличии снежного покрова с разрешением 4 км, размещаемые на сервере NOAA (<ftp://140.90.213.161/autosnow/4kmNH/>), которые интерполировались в узлы сетки модели COSMO-Ru по алгоритму, описанному в работе [Алферов, Копейкин, 2015].

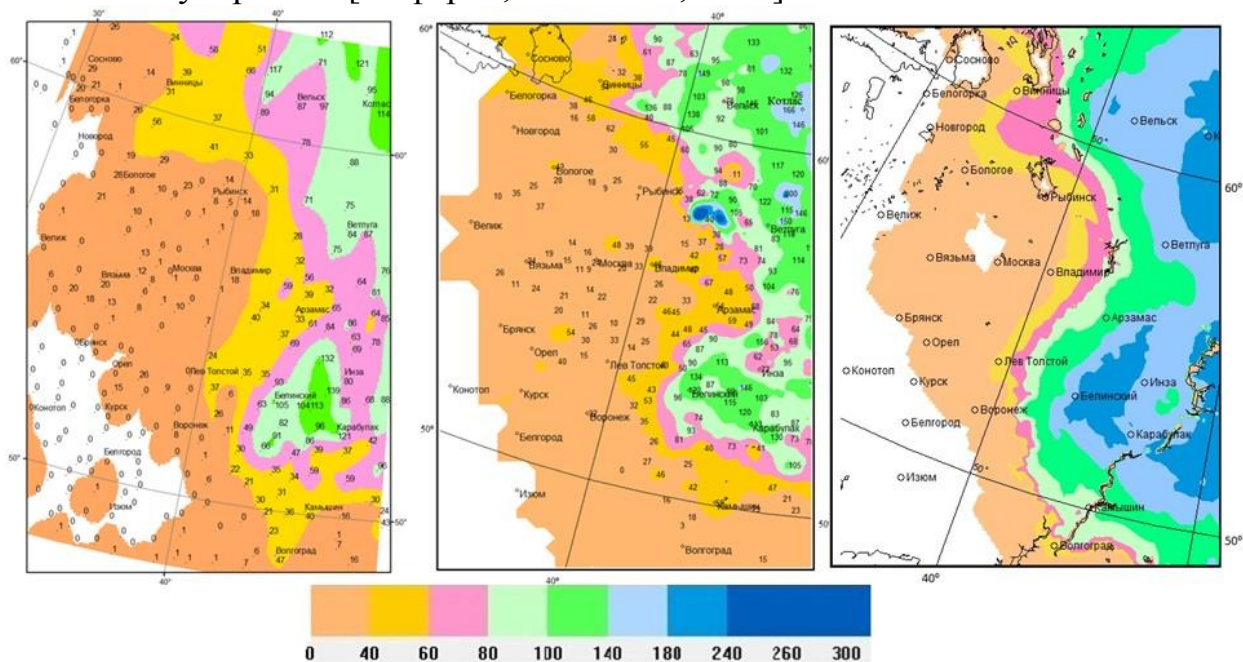


Рис. 3. Построенные на основании автоматизированной методики расчетов по ММСП (слева), с помощью ГИС Метео по снегомерным съемкам (в центре) карты водного эквивалента снежного покрова и начальные данные водного эквивалента снега для модели COSMO-Ru7 (справа) для 28 февраля 2014 г.

В качестве ППП, необходимых для интерполяции в узлы расчетной модельной сетки, использовались начальные поля характеристик снежного покрова, используемые системой COSMO-Ru из глобальной СУД (в нашем

случае – Немецкой службы погоды) [Ривин, Розинкина, Багров, Блинов, 2012].

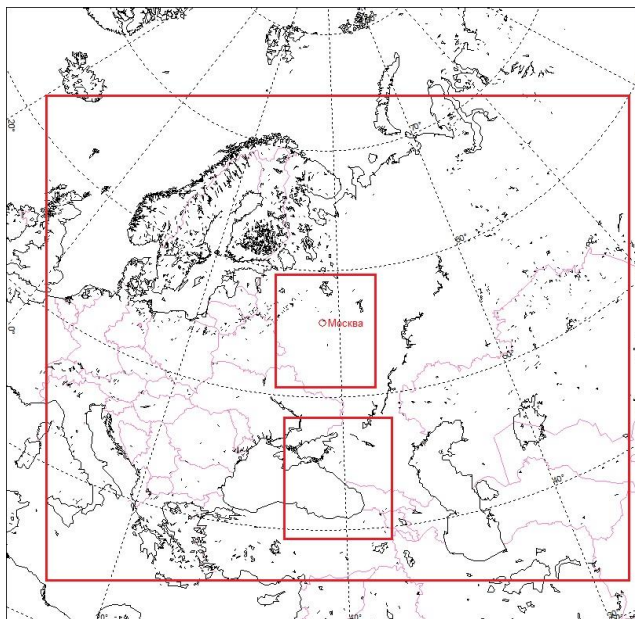


Рис.4. Области расчетов модели COSMO-Ru с шагами сетки 7 км («Европа») и 2,2 км (Центральный и Северо-Кавказский регионы)

Процедура объективного анализа выполнялась для величин отношений значений водного эквивалента снега на основе СУД к рассчитанным по ММСП, для точек метеостанций, для которых выполнялись вычисления ММСП; аналогичная процедура выполнялась для плотности снега. Выбор такого алгоритма был обусловлен тем, что нормированные значения оказались существенно менее изменчивы в пространстве, чем абсолютные величины, в частности, это позволило более обоснованно строить поля анализа для районов с малой плотностью метеостанций. Отношения в среднем принимали значения в диапазоне от 0 до 20. Случаи с малыми значениями водного эквивалента снежного покрова менее 5 мм в ППП или по результатам расчетов ММСП контролировались введением дополнительных условий в программном коде. Затем полученные отношения со станций интерполировались с помощью триангуляции Делоне на сетку модели. И, наконец, исходные ППП водного эквивалента и плотности снега делились на полученные поля безразмерных величин.

После выполнения процедур коррекции ППП из «материнской» системы глобального моделирования исходные значения характеристик снежного покрова (плотности и водного эквивалента) в файле с начальными полями для мезомасштабной модели COSMO-Ru заменялись на модифицированные. Тестирование показало, что для территории Центрального региона с густой сетью метеостанций поле, подготовленное только по расчетам ММСП с помощью интерполяции в узлы сетки модели COSMO-Ru практически совпало с полем, построенным по вышеописанному алгоритму.

В ходе выполнения данной работы было установлено, что для горных районов Кавказа (в частности, интерес к этой проблеме был связан с

подготовкой метеобеспечения Олимпиады в Сочи) шаг информации ИСЗ в 4 км является весьма грубым, учитывая большую изрезанность территории и большие перепады высот и температур. Были предприняты эксперименты по Северо-Кавказскому региону с использованием данных спектрорадиометра MODIS с разрешением 250 м. Это позволило уточнить информацию о состоянии снежного покрова в сильно пересеченной горной местности и существенно более реалистично спрогнозировать температуру воздуха в долинах, в которых снежный покров уже разрушался или растаял.

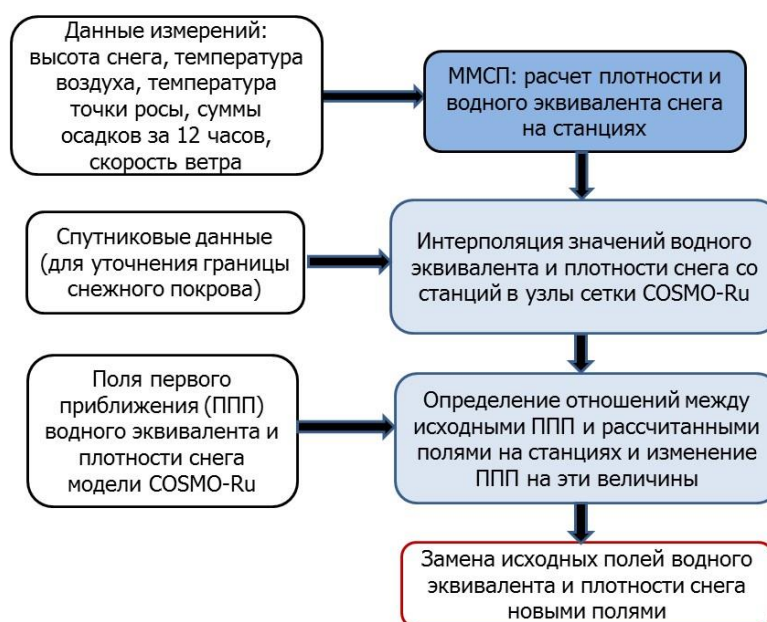


Рис.5. Схема объективного анализа характеристик снежного покрова для модели численного прогноза погоды (на примере COSMO-Ru)

Глава 3. Численные эксперименты с использованием уточненного объективного анализа характеристик снежного покрова в рамках системы ЧПП COSMO-Ru

Экспериментальные прогнозы рассчитывались по начальным данным за срок 00 ВСВ для «снежного» сезона 2014-2015 гг. в квази-оперативном режиме для территории Европы по модели COSMO-Ru7 (шаг 7 км) до заблаговременности 78 часов, для Центрального региона по модели COSMO-Ru2 – на 24 часа. Также были посчитаны эксперименты для некоторых дат в 2013-2014 гг. в период таяния снежного покрова по модели COSMO-Ru2 для территорий Центрального и Северо-Кавказского регионов

В разделе 1 приведены результаты расчетов с модифицированными начальными полями характеристик снега по модели COSMO-Ru7. Верификации для периода 24 февраля – 10 апреля 2015 г., выполненные в пакете VERSUS [Boucouvala, Celozzi, 2013] по примерно 800 станциям, показали, что использование подготовленных по предложенной технологии полей плотности и водного эквивалента снега с существенным уточнением границы снежного покрова на основе спутниковых данных с разрешением 4

км приводит к улучшению прогноза приземной температуры воздуха вблизи границы снежного покрова и при наличии небольшого снежного покрова (уменьшение $RMSE$ на $0,5-1,5^{\circ}\text{C}$ и средней ошибки – на $0,5-1,0^{\circ}\text{C}$) (рис.6).

В разделе 2 представлены результаты экспериментов, проведенных для территории Центрального региона. Выявленные закономерности для территории Европы отмечены и для Центрального региона.

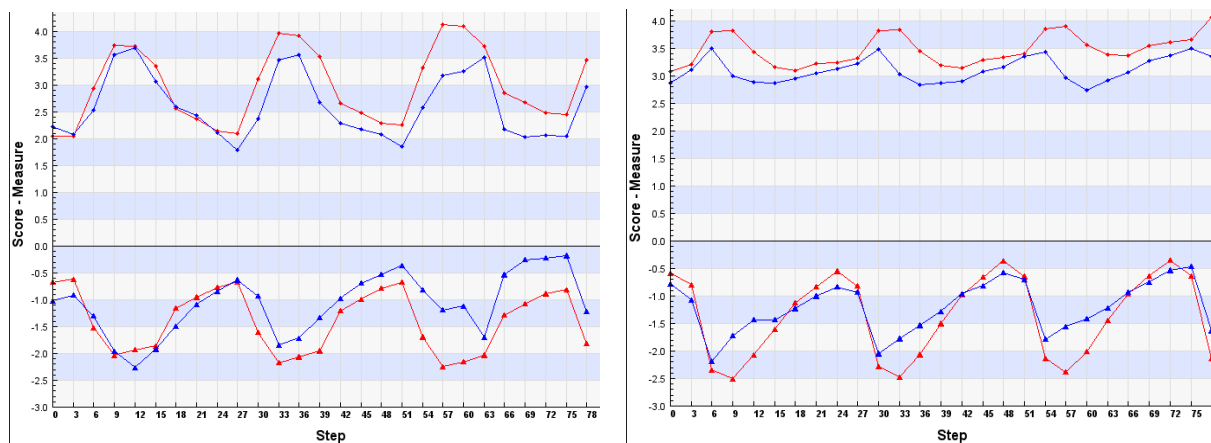


Рис.6. Средняя ошибка (снизу) и среднеквадратическая ошибка (сверху) прогнозов приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) при условии положительных (слева) и отрицательных (справа) наблюдаемых температур воздуха на станциях для территории Европы, рассчитанных по экспериментальной (синяя линия) и оперативной (красная линия) версиям технологии COSMO-Ru7 для периода 24 февраля – 10 апреля 2015 г.

При сравнении с данными измерений оказалось, что предложенная технология позволяет уточнить прогноз температуры воздуха для области вблизи границы снежного покрова на несколько градусов. Разности в приземной температуре, рассчитанной по технологии COSMO-Ru2 в оперативном и экспериментальном вариантах, для 12-часовой заблаговременности показаны на рис.7 и табл.2. Для этой области характерны и различия в значениях прогнозов альбедо подстилающей поверхности, скорости ветра, потоках тепла. Обнаружены отличия в прогностических полях облачности для различных областей Центрального региона (которые составляют до 100%), однако выделить закономерности их возникновения не удалось.

Выполненные так называемые условные верификации прогнозов приземной температуры воздуха в пакете VERSUS для приблизительно 150 станций показали, что наименьшие по величине средние (до $-2,5^{\circ}\text{C}$) и среднеквадратические (до 4°C) ошибки наблюдаются при тающем снежном покрове (имеющим небольшую высоту) и в случае безоблачных условий. Ошибки $T2m$ при прогнозировании положительных температур воздуха моделью COSMO-Ru2 больше, чем при прогнозировании отрицательных. Улучшение прогнозирования температур с использованием предложенной технологии может наблюдаться как для положительных, так и для отрицательных температур воздуха.

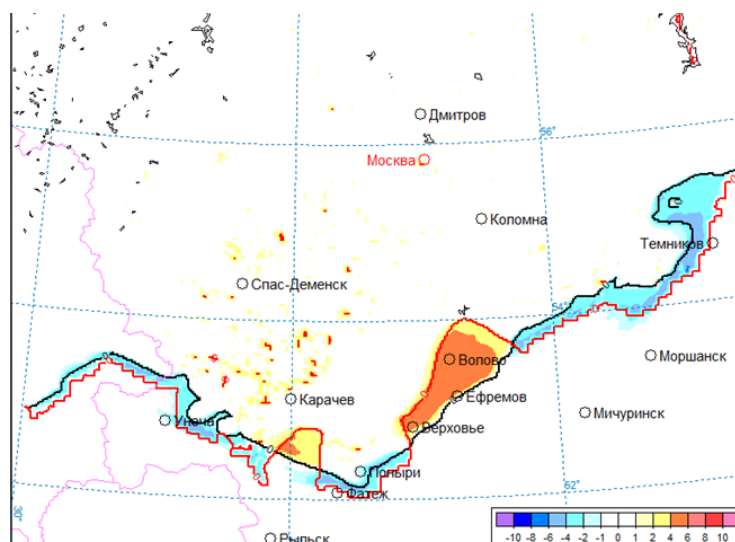


Рис.7. Разность между значениями приземной температуры воздуха (°C) в прогнозах на 12 часов по экспериментальному и оперативному вариантам технологии COSMO-Ru2 от 00 ВСВ 10 апреля 2013 г. Линиями показан прогноз границы снежного покрова: черная – оперативный вариант, красная – эксперимент

Таблица 2. Приземная температура воздуха (°C) в дневной (12 часов ВСВ) и ночной (00 часов ВСВ) сроки на станциях вблизи границы снежного покрова по данным измерений и прогнозам на 12 и 24 часа по оперативному и экспериментальному вариантам технологии COSMO-Ru2

Станция	10 апреля 2013, 12 ВСВ			11 апреля 2013, 00 ВСВ		
	Наблюдения, t°C	Оперативный счет, t°C/ абс. ошибка, °C/ оправдываемость%	Эксперимент t°C/ абс. ошибка, °C/ оправдываемость%	Наблюдения, t°C	Оперативный счет, t°C/ абс. ошибка, °C/ оправдываемость%	Эксперимент, t°C/ абс. ошибка, °C/ оправдываемость%
Ефремов	8,0	4,3/ 3,7/ 0	6,6 /1,4/ 100	-0,4	-0,5/ 0,1/ 100	-0,6/ 0,2/ 100
Волово	6,9	0,6/ 6,3/ 0	5,8 /1,1/ 100	-1,1	-3,6/ 2,5/ 100	-1,7/ 0,6/ 100
Верховье	7,0	1,2/ 5,8/ 0	6,0 /1,0/ 100	0,8	-1,2/ 2,0/ 100	-0,2/ 1,0/ 100
Темников	7,2	6,2/ 1,0/ 100	5,6 /1,6/ 100	0,2	0,7/ 0,5/ 100	-3,0/ 2,8/ 100
Унеча	7,1	6,6/ 0,5/100	5,4 /1,7/ 100	1,0	0,4/ 0,6/ 100	0,7/ 0,3/ 100
Фатеж	8,1	5,6/ 2,5/100	6,7 /1,4/ 100	-1,5	-3,0/ 1,5/ 100	0,3/ 1,8/ 100
Ср. абс. ошибка, °C/ ср. оправдываемость, %		3,3°/ 50%	1,4°/100%		1,2°/ 100%	1,1°/ 100%

Раздел 3 содержит прогнозы для 8 и 31 марта 2013 г., рассчитанные по модели COSMO-Ru2 для Северо-Кавказского региона, с применением предложенного ОА характеристик снежного покрова, а также – с использованием данных высокого разрешения спектрорадиометра MODIS (250 м). Так, прогноз поля водного эквивалента на 12 часов получается более детальным при использовании модифицированных начальных данных (рис.8).

С помощью верификаций, выполненных в пакете VERSUS, для приблизительно 200 станций, расположенных в Северо-Кавказском регионе, 8 марта 2013г. отмечено улучшение прогнозирования приземной температуры воздуха, особенно в дневные часы: *RMSE* уменьшилась на 0,5-2°C, средняя ошибка – на 0,2-1°C. Улучшение прогнозов температуры воздуха было в первую очередь более характерно для долин.

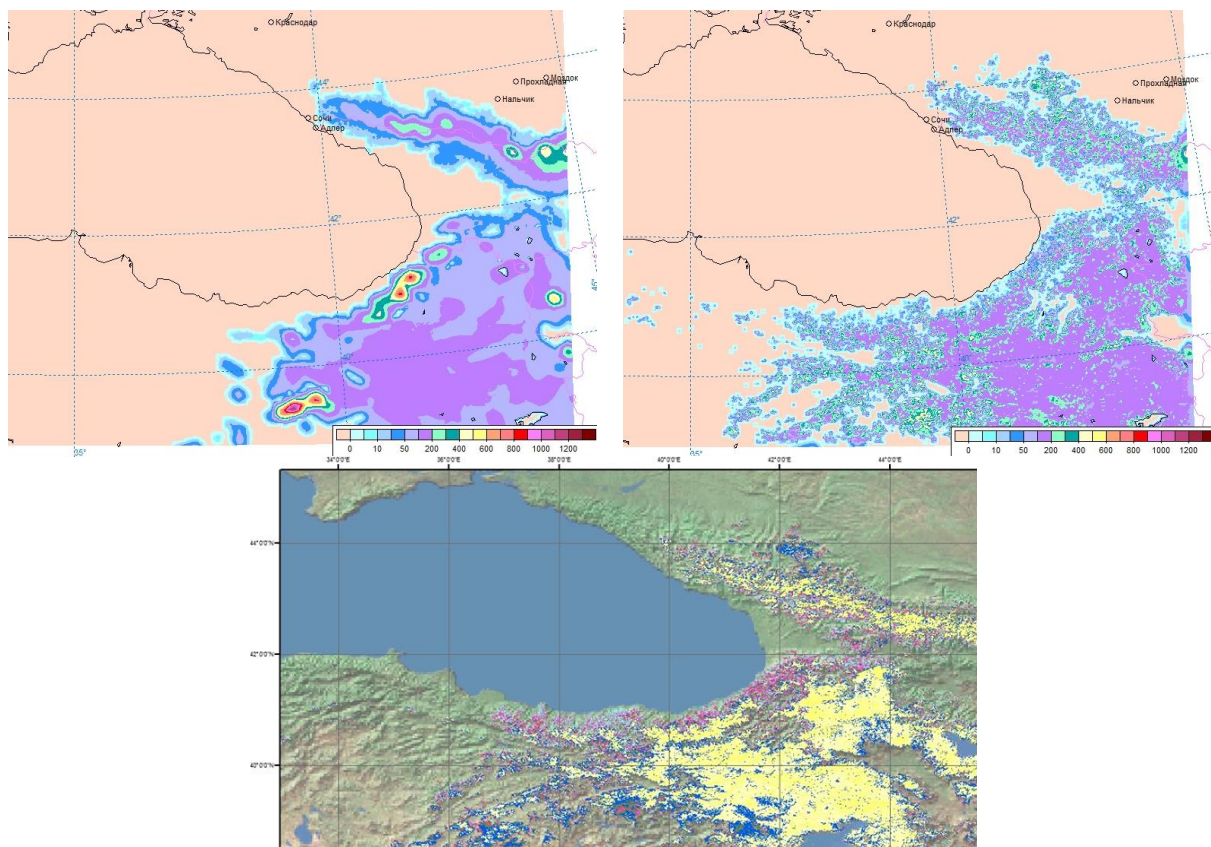


Рис.8. Значения водного эквивалента снежного покрова (мм) в прогнозах на 12 часов по оперативному (слева) и экспериментальному (справа) версиям технологии COSMO-Ru2 от 00 UTC 8 марта 2013 г. Внизу – данные MODIS о наличии снежного покрова 7 марта 2013г.

Проведение такого рода экспериментов ограничено тем, что данные со спектрорадиометра MODIS могут быть использованы только для случаев безоблачной погоды и тем, что выделение кластеров снежного покрова на их основе выполняется вручную.

Глава 4. Применение алгоритмов ММСП для оценки высоты свежеснегоснега

Раздел 1 посвящен описанию метода для расчета характеристик свежего снега для небольшого периода снегонакопления (до 12 часов) по наблюдаемым или прогнозируемым суммам осадков в виде снега. Основу метода составили зависимости, предложенные в работе [Bartlett, MacKay, Versegny, 2006] и используемые в ММСП.

Для анализа успешности предложенного алгоритма он был сравнен с несколькими подходами, а именно:

- с линейной зависимостью от температуры воздуха на высоте 700 гПа, представленной в работе [McGurk, Azuma, Kattelmann, 1988];
- с формулой для расчета плотности свежеснегоснега, используемой в блоке параметризаций подстилающей поверхности TERRA модели COSMO-Ru, в зависимости от температура самого нижнего модельного уровня атмосферы [Doms et al., 2011];

- с использованием постоянной плотности 100 кг/м^3 , зачастую используемой в синоптической практике при составлении прогноза погоды для перевода величины осадков в высоту снега.

Для оценок качества были использованы наблюдения отряда лавинной безопасности в районе станции Горная Карусель (1500 м) по ряду отдельных снегопадов в январе 2013 г. (результаты см. на рис.9). Как показывают наблюдения по станции Горная Карусель, предложенный расчет высоты свежеснегавшего снега дает неплохое приближение к измеренным на станции значениям, что является более точным в сравнении с остальными алгоритмами (рис.9). Так, *RMSE* значений высоты свежеснегавшего снега в случае использования алгоритма составляет 1,1 см при средней абсолютной ошибке 2,9 см, а относительная ошибка составляет 8,3 %. Зависимость от температуры на 700 гПа может быть применима лишь для ограниченного интервала температур. Использование постоянной плотности 100 кг/м^3 и формулы из модели TERRA, как правило, приводит к занижению значений высоты свежего снега.

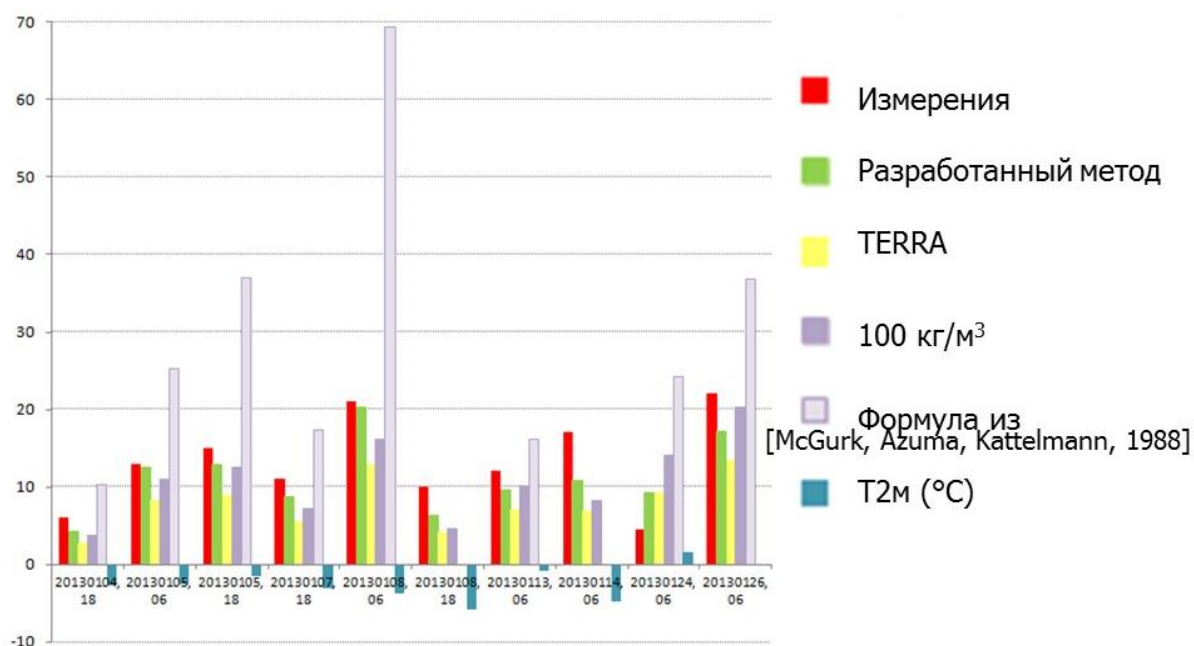


Рис.9. Высота свежеснегавшего снега (см) показана цветом: красный – по измерениям на станции Горная Карусель, салатовый – по разработанному алгоритму с использованием приземной температуры ($^{\circ}\text{C}$), желтый – по расчетам, используемым в схеме параметризации TERRA модели COSMO, фиолетовый – при принятии значения постоянной плотности 100 кг/м^3 , лиловый – по линейной зависимости от температуры на 700 гПа. Синим цветом показаны значения приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$)

С помощью наблюдений сети станций и сводок дорожных служб г. Москвы удалось провести численный эксперимент с использованием предложенного метода для случая сильного снегопада по Центральному федеральному округу 3-4 февраля 2013 г. В частности, сведения дорожных служб позволили учесть приращение высоты снега до 25 см, не зафиксированные в стандартных сводках кода SYNOP (согласно которым

высота снега увеличилась всего на 13 см, так как стандартные измерения осуществляются раз в сутки: за это время снег уже уплотнится). Рассчитанные по модели COSMO-Ru7 прогностические суммы осадков получились несколько заниженными по сравнению с 12-часовыми данными наблюдений (19,2 и 25,0 мм, соответственно). С помощью предложенного метода на основе пересчета данных измерений 12-часовых сумм осадков в величину прироста снега были получены оценки высоты свежего снега в 25,2 см (что соответствует сведениям дорожных служб). Проведенное исследование показывает применимость метода и его бóльшую эффективность при использовании точных требуемых исходных данных о суммах осадков и температуре воздуха, при которой они выпадали.

В разделе 2 дается описание модификации блока постпроцессинга выходной продукции модели COSMO-Ru, позволяющей получать прогностические значения высоты свежевывпавшего снега в виде метеограмм для отдельных пунктов и прогностических карт по выделенной территории. В основу положены результаты раздела 1 по анализу нескольких зависимостей для расчета плотности свежевывпавшего снега. Ранее подготовки такой выходной продукции модели COSMO-Ru не осуществлялось.

Заключение

В результате выполненной работы:

- разработана одномерная многослойная модель снежного покрова ММСР, описывающая межсуточные изменения основных характеристик снежного покрова, которая используется в технологии объективного анализа для прогностических моделей атмосферы. В качестве входных данных для модели снега используются оперативные данные наблюдений на метеостанциях, передаваемые в международный обмен ВМО в коде SYNOP, что позволяет использовать ММСР в оперативном режиме;
- выполнено тестирование ММСР на основе снегомерных съемок и получены количественные оценки реалистичности результатов ее вычислений водного эквивалента снега для различных регионов Европейской России;
- впервые в России на основе результатов ММСР, спутниковых данных высокого разрешения (4 км) и ППП реализована технология объективного анализа водного эквивалента и плотности снежного покрова;
- показано улучшение качества прогноза приземной температуры воздуха вблизи границы снежного покрова (среднеквадратическая ошибка уменьшилась на 0,5-1,5°C) при использовании предложенной технологии для мезомасштабной модели атмосферы COSMO-Ru;
- предложен, протестирован и реализован метод вычисления характеристик свежевывпавшего снега на основе данных о суммах осадков и приземной температуре, который включен в оперативную систему

краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru и международную систему объединенного постпроцессинга международного консорциума по мелкомасштабному моделированию COSMO FieldExtra [URL: <http://www.cosmo-model.org/content/support/software/default.htm>].

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Система расчетов характеристик снежного покрова для формирования начальных полей при численном погодном моделировании (на примере COSMO-Ru) // Метеорология и гидрология, 2015, №5, с. 20-32.
2. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития / Ривин Г.С., Розинкина И. А., Вильфанд Р. М., Алферов Д. Ю., Астахова Е. Д., Блинов Д. В., Бундель А. Ю., Казакова Е. В., Кирсанов А. А., Никитин М. А., Перов В. Л., Суркова Г. В., Ревокатова А. П., Шатунова М. В., Чумаков М. М. // Метеорология и гидрология, 2015, №6, с. 58-70.
3. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Система автоматизированных расчетов влагозапасов снега на основе численного моделирования и усвоения данных стандартных метеорологических измерений // Труды ГГО, 2014, вып.571, с. 114-133.

Статьи в изданиях, не входящих в список ВАК

4. Негидростатическая система Гидрометцентра России мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru / Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Д.В. Блинов, А.Ю. Бундель, В.Л. Перов, Г.В. Суркова, Д.Ю. Алферов, Е.В. Казакова, А.А. Кирсанов, А.П. Ревокатова, М.В. Шатунова, М.М. Чумаков // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Труды Международной конференции, посвященной памяти академика А.М. Обухова / Отв. ред. Г.С. Голицын, И.И. Мохов, С.Н. Куличков, М.В. Курганский, О.Г. Чхетиани. М., ГЕОС, 2014, с. 265-273.
5. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Расчет высоты свежевыпавшего снега с помощью результатов атмосферного моделирования (на примере COSMO-Ru) // Труды Гидрометцентра России, 2014, вып.352, с. 74-84.
6. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Модель для расчета характеристик снежного покрова на основе данных наблюдений стандартной метеорологической сети // Труды Гидрометцентра России, 2014, вып.352, с. 85-102.
7. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Модуль расчетов высоты свежевыпавшего снега в зависимости от метеоусловий по данным измерений или численных прогнозов 6/12-ти часовых сумм осадков. 2014. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2014618542 от 25.08.2014.

8. Kazakova E., Chumakov M., Rozinkina I. Initial fields of snow cover characteristics preparation for COSMO-Ru // COSMO Newsletter No.14, 2014, p. 37-42.
9. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Алгоритм расчета высоты свежеснежного покрова, предназначенного для постпроцессинга систем атмосферного моделирования (на примере COSMO) // Труды Гидрометцентра России, 2013, вып. 350, с. 164-179.
10. Kazakova E., Chumakov M., Rozinkina I. Realization of the parametric snow cover model SMFE for snow characteristics calculation according to standard net meteorological observations // COSMO Newsletter No.13, 2013, p. 39-49.
11. Kazakova E., Rozinkina I. Testing of Snow Parameterization Schemes in COSMO-Ru: Analysis and Results // COSMO Newsletter No.11, 2011, p. 41-51.
12. Казакова Е.В., Розинкина И.А., Мачульская Е.Е. Результаты тестирования новой схемы параметризации снежного покрова в условиях таяния снега в модели COSMO-RU // Труды государственного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», 2010, вып.344, с. 147-164.
13. Казакова Е.В. Влияние схемы параметризации снежного покрова в мезомасштабной модели COSMO-RU на прогноз температуры воздуха // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2012» / Отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, М.В. Чистякова. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2012.
14. Казакова Е.В. Схемы параметризации снежного покрова в мезомасштабной модели COSMO-RU. Исследования молодых географов: Сб. ст. победителей секции «География» XVII Международной молодежной науч. конф. «Ломоносов» / Отв. ред. А.Н. Иванов. - М.: МАКС Пресс, 2010, с. 27-32.
15. Казакова Е.В. Схемы параметризации снежного покрова в мезомасштабной модели COSMO-RU: численные эксперименты и возможности улучшения прогноза // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2010» / Отв. ред. И.А. Алешковский, П.Н. Костылев, А.И. Андреев, А.В. Андриянов. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2010.
16. Казакова Е.В. Об особенностях воспроизведения эволюции снежного покрова в зависимости от схем параметризации // Михаил Арамаисович Петросянц и современные проблемы метеорологии и климатологии (к 90-летию со дня рождения М.А. Петросянца): Всероссийская конференция. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, 17-18 ноября 2009 г.: Тезисы докладов / Под ред. Кислова А.В. М.: МАКС Пресс, 2009, с. 46.