

# СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 551.578.46

**Численное моделирование снежного покрова на о. Гукера (архипелаг Земля Франца-Иосифа)**

© 2013 г. В.С. Сократов, **А.Б. Шмакин**

Институт географии РАН, Москва

*vasilii@mac.com*

*Статья принята к печати 27 марта 2013 г.*

Арктика, метелевое испарение, модель тепловлагообмена, снежный покров.  
Arctic, blizzard evaporation, heat-moisture-exchange model, snow cover.

Рассмотрены результаты численного воспроизведения характеристик снежного покрова с помощью модели тепловлагообмена SPONSOR. Эксперименты проводились для Земли Франца-Иосифа с типичным арктическим климатом. Установлено, что на территориях, где наблюдаются высокие скорости ветра, толщина снежного покрова в значительной степени связана с величиной метелевого испарения. Учёт этого параметра заметно улучшает качество расчётов численной модели. Некоторые расхождения между рассчитанными и реальными значениями толщины снежного покрова можно объяснить неточностями в измерениях осадков и погрешностями вычислений приходящей солнечной радиации. Последнее, в основном, объясняется невысокой точностью наблюдений за облачностью.

## Введение

Один из современных, быстро развивающихся методов исследования сезонной динамики снежного покрова — численное моделирование. Во многих научных центрах, занимающихся численным моделированием климата и локального тепловлагообмена, разработаны процедуры, позволяющие достаточно детально воспроизводить сезонную динамику снежного покрова [9]. Как правило, снежный покров моделируется совместно с гидротермическим режимом почвы, нередко — с учётом сезонной динамики растительности. В наиболее современных моделях снежного покрова встроены процедуры выделения специфических слоёв снега (ледяные корки, глубинная изморозь и т.д.) и их эволюции в течение сезона. Значительным этапом в разработке проблем численного моделирования снежного покрова стал международный эксперимент по сравнению моделей снежного покрова SnowMIP [11, 14], в котором участвовали специалисты разных стран мира, ведущие работы в данном направлении.

В лаборатории климатологии Института географии РАН в течение ряда лет разрабатывалась численная модель тепловлагообмена на суше

SPONSOR, в состав которой входила и модель снежного покрова. Модель SPONSOR была представлена во всех важнейших международных проектах сравнения моделей такого класса, в том числе SnowMIP, PILPS и др. В последние годы эта модель была значительно усовершенствована путём введения процедур послышной эволюции с учётом сезонной динамики снежных кристаллов [8]. Модель тестировалась на ряде полигонов, где были получены достаточно хорошие результаты, однако предварительные эксперименты для условий Арктики показали, что здесь точность вычисления характеристик снежного покрова невысокая. Цель данной работы — улучшить качество воспроизведения характеристик снежного покрова моделью тепловлагообмена SPONSOR в условиях арктического ледникового купола. В распоряжении авторов были результаты почти двухлетних полевых измерений на ледниковом куполе Чурляниса (о. Гукера, Земля Франца-Иосифа), полученные сотрудниками Института географии АН СССР в период Международного геофизического года (МГГ) в 1957–1959 гг. Модель тестировалась с использованием данных метеорологических и снегомерных измерений, полученных на этом полигоне в период МГГ.

### Характеристика модели SPONSOR

Взаимодействие снежного покрова с подстилающей почвой и атмосферой, а также с растительностью описывается с помощью численной модели теплообмена на суше SPONSOR, разработанной в лаборатории климатологии Института географии РАН. В модели SPONSOR предусматривается расчёт всех составляющих теплового и водного баланса на суше, а также переменных состояний, среди которых: эффективная температура поверхности ландшафта; температура почвы; её влагосодержание; количество замёрзшей воды в почве; альбедо и т.д. Все эти параметры рассчитываются на каждом шаге по времени. При работе с моделью требуется на каждом шаге задавать значения нескольких метеорологических переменных, например: температуры и влажности воздуха на высоте 2 м; скорости ветра на высоте датчика; интенсивности осадков; потоков приходящей коротко- и длинноволновой радиации; атмосферного давления. Для работы схемы необходимы значения ряда ландшафтных параметров, часть которых может иметь сезонный ход. Эти параметры в каждой ячейке суши жёстко связаны с типами растительности или почвы. Кроме того, задаются (в качестве нижних граничных условий по теплу и влаге) значения глубинной температуры грунта и глубины залегания грунтовых вод (для экспериментов по Земле Франца-Иосифа последний параметр не использовался). Число и толщина расчётных уровней в почве могут меняться. В данной работе использовалась семиуровневая версия. Особенности базовой версии модели теплообмена SPONSOR (со старой, упрощенной версией схемы снежного покрова) изложены в работе [15].

Новая модель снежного покрова детально описана в работе [8], где дана характеристика процессов, которые вносят наибольший вклад в формирование теплофизических характеристик снега и важны для описания взаимодействия снежного покрова с атмосферой и почвой. К ним относятся: формирование нового слоя снега; изменение плотности слоёв снега вследствие вязкого и ветрового уплотнения; изменение температуры слоёв снега в результате теплообмена с атмосферой и почвой, поглощения солнечной радиации и фазовых переходов воды в толще снега; испарение; таяние; перенос талой воды и её вторичное замерзание; изменение влажности снега за счёт таяния и просачивания талой воды в толщу, а также в результате поглощения жидких осадков; изменение альбедо снега и свойств снега при смене типа слоёв. Отметим, что для определения изменений температуры важную

роль играет корректное описание изменяющейся теплопроводности и теплоёмкости снега.

Основная структурная единица модели снежного покрова — *слой снега*. Считается, что на каждом шаге по времени при наличии твёрдых осадков формируется отдельный слой снега с определёнными начальными свойствами. В дальнейшем, под воздействием различных процессов свойства слоя изменяются. При развитии снежной толщи соседние слои одного типа, близкие по свойствам, могут объединяться. При моделировании снежный покров рассматривается как многослойная среда, каждый слой которой характеризуется определёнными температурой, массой (водным эквивалентом), толщиной, плотностью, влажностью, фазовым состоянием содержащейся воды, теплоёмкостью, теплопроводностью и максимальной водоудерживающей способностью. Наряду с рассмотрением снежного покрова как набора слоёв, его можно изучать и как единый объект — *колонка снега*. Колонка описывает интегральные свойства снежного покрова в данной точке пространства и характеризуется, кроме физических свойств, ещё и определённым типом по какой-либо принятой классификации (например [16]).

### Метелевое испарение по А.К. Дюнину

Предварительные эксперименты с данными, собранными на Земле Франца-Иосифа, позволили установить, что для улучшения качества воспроизведения моделью толщины снежного покрова необходимо вводить дополнительный параметр, отражающий вклад сильных ветров в режим снежного покрова арктического острова. Такой параметр впервые был введён в работах А.К. Дюнина, который занимался исследованиями метелей и влияния ветра на снежный покров. Параметр этот оказался актуален для исследуемой территории в связи с частыми сильными ветрами, и его вычисление было добавлено в структуру модели SPONSOR.

Использование формулы А.К. Дюнина значительно влияет на результат расчёта толщины снежного покрова. Для расчёта метелевого испарения он использовал следующее предположение [2]:

$$I_M = Q_H / L_3,$$

где  $I_M$  — интенсивность метелевого испарения;  $Q_H$  — транспортирующая способность метели;  $L_3$  — предельная дальность переноса снега.

Транспортирующая способность метели рассчитывается по формуле

$$Q_H = 0,077(v_\phi - 5)^3, \quad (1)$$

где  $v_\phi$  — скорость ветра на высоте флюгера.

Величина  $L_3$  зависит от климата данной территории, т.е. она не может рассматриваться как универсальная [1]. По А.С. Чернявскому [7], для западной территории России она равна 1750 м, а для Западной Сибири – 2–3 км. В Арктике она колеблется от 5 до 10 км, в Антарктиде, по данным В.М. Котлякова [3], может составлять 10–20 км и более. В публикациях А.К. Дюнина не указана скорость ветра, начиная с которой можно применять формулу (1), хотя можно предположить, что такой порог – 5 м/с. Метелевое испарение означает подъём снежинок с поверхности земли и их испарение под действием ветра, т.е. обратно на поверхность над рассматриваемой территорией эти снежинки не падают. Мы приняли, что метелевое испарение начинается при скорости ветра более 5 м/с, причём при скорости ветра 7 м/с испаряется снег с плотностью не более 96 г/м<sup>3</sup>, а при скорости 26 м/с – не более 400 г/м<sup>3</sup>. В случае промежуточных значений скорости плотность испаряющегося снега возрастает по линейному закону. Ограничения по плотности испаряющегося снега объясняются тем, что иначе даже при не очень сильных ветрах в модели испарялась бы ветровая корка снега, что невозможно в принципе.

Для учёта метелевого испарения при моделировании снежного покрова существует также метод, предложенный в работе [10], однако его применение в модели SPONSOR при предварительном тестировании дало неудовлетворительные результаты – испарение снега выросло на очень незначительную величину, поэтому было решено использовать метод учёта метелевого испарения, основанный на подходе А.К. Дюнина. Трудности с применением метода из работы [10] связаны с многочисленными эмпирическими коэффициентами, входящими в соответствующее уравнение (11 коэффициентов!) и, очевидно, калиброванными для конкретных условий севера Канады. Вероятно, модель PIEKTUK [10] с соответствующей поправкой на метелевое испарение также могла быть использована для ледникового купола Чурляниса, однако для этого необходимы были длительные процедуры калибровки параметров и хорошее знание самой модели.

#### Численный эксперимент и результаты расчётов

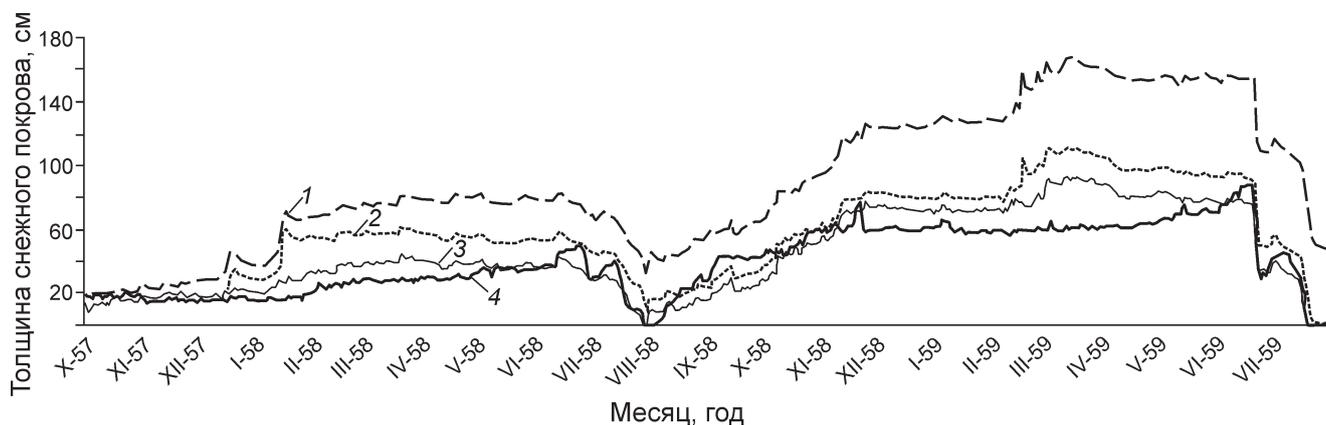
Для сравнения рассчитанных и наблюдаемых характеристик снежного покрова использовались материалы экспедиции Института географии АН СССР, проводившейся в период МГГ на архипелаге Земля Франца-Иосифа с октября 1957 г. до июля 1959 г. [5]. Наблюдения вели на ограниченной

территории ледникового покрова Земли Франца-Иосифа – на островах Гукера и Хейса. На о. Гукера наблюдения выполнялись на ледниковых куполах с фирновым (купол Джексона) и с инфильтрационно-конжеляционным питанием (купола Чурляниса и Безымянный). Основной объект исследований – ледниковый купол Чурляниса на о. Гукера. Исходные данные метеонаблюдений были доступны с шагом 6 часов, но для моделирования они были проинтерполированы в ряды с шагом 1 час.

При численных экспериментах сравнивались ряды толщины снежного покрова, рассчитанной с помощью модели SPONSOR, и независимых данных наблюдений для той же местности. Отметим, что основная характеристика количества снега в модели – не толщина, а масса. Толщина каждого слоя вычисляется по его массе и плотности на данном шаге по времени, а затем суммируется по всем слоям. Воспроизведение преобразований плотности снега в течение холодного сезона – самостоятельная задача, для условий Арктики достаточно сложная. На рис. 1 отчётливо видно различие между данными наблюдений и результатами, полученными в процессе расчётов. Самое сильное различие с данными наблюдений даёт расчёт толщины снежного покрова без метелевого испарения. С учётом метелевого испарения по формуле А.К. Дюнина рассчитанная толщина снежного покрова заметно приближается к реальной. Отдельно выведен рассчитанный в модели ряд толщины снежного покрова без учёта трёх случаев сомнительного снегопада: 18 декабря 1957 г., 15 января 1958 г. и 15 февраля 1959 г., когда по данным наблюдений за сутки выпало большое количество осадков, однако это никак не повлияло на толщину снежного покрова. Эти снегопады отмечены как сомнительные самими наблюдателями [4]. В начальной версии расчётов снегопады в эти дни учитывались как реальные, что и привело к значительному расхождению с результатами наблюдений. После 10-кратного искусственного сокращения выпавших в эти дни осадков результат существенно улучшился.

Теперь рассмотрим расчёт толщины снежного покрова с учётом метелевого испарения по формуле А.К. Дюнина без случаев сомнительного снегопада.

**Качество модельных расчётов по отдельным сезонам.** Общий коэффициент корреляции между рядом толщины снежного покрова по данным наблюдений и по результатам расчётов с учётом метелевого испарения равен 0,91. Это означает, что в общем за весь период наблюдений модель хорошо воспроизводит



**Рис. 1.** Толщина снежного покрова (по вертикальной оси, см) на куполе Чурляниса (о. Гукера, Земля Франца-Иосифа) в 1957–1959 гг. по данным наблюдений и по расчётам с помощью модели SPONSOR:

1 – рассчитанные значения без учёта метелевого испарения; 2 – то же, с учётом метелевого испарения; 3 – то же, с учётом метелевого испарения без случаев сомнительных метелей; 4 – данные наблюдений

**Fig. 1.** Observational and SPONSOR model calculation data of snow depth (vertical axis, cm) on the Čurlionis ice cap (Hooker island, Franz Josef Land) in 1957–1959.

1 – calculated data without accounting blizzard evaporation; 2 – with blizzard evaporation; 3 – with blizzard evaporation but without cases of doubted blizzards; 4 – observational data

сезонные изменения толщины снежного покрова. Однако по разным сезонам картина не столь однозначна. На рис. 2 сравниваются ряды толщины снежного покрова по вычислениям на модели и по данным наблюдений в разные сезоны года. Зимние сезоны (декабрь–февраль) 1957/58 и 1958/59 гг. охарактеризованы на графиках *a* и *д* рис. 2 соответственно. Коэффициент корреляции между рядами реально наблюденных значений и рассчитанных для зимы 1957/58 г. составляет 0,89, а для зимы 1958/59 г. – 0,05. Аналогичный коэффициент корреляции для весенних месяцев (март–май) 1958 г. составляет – 0,68, а 1959 г. – 0,1 (графики *б* и *е* на рис. 2 соответственно), т.е. эволюция снежного покрова в этот сезон воспроизводится значительно хуже, чем зимой, вплоть до различий в тенденции (рост или сокращение толщины снега). Коэффициент корреляции в летние месяцы 1958 г. (июнь–август) составляет 0,87, а 1959 г. (июнь–июль) – 0,95 (графики *в* и *ж* на рис. 2 соответственно). Лето – сложный период для моделирования снежного покрова, так как в данном регионе в это время снег тает. На ледниковом куполе Чурляниса Земли Франца-Иосифа, где велись измерения, период отсутствия снежного покрова (т.е. снега, не перешедшего в фирн) редко превышает две–три недели. Низкие температуры в течение всего года, а также присутствие ледника под снежным покровом дают возможность снежному покрову растаять до конца только на короткое время. Тем не менее, для обоих летних сезонов с помощью модели была вычислена

динамика толщины снега с хорошей точностью. Коэффициент корреляции между измеренными и вычисленными значениями толщины снега осенью 1958 г. (сентябрь–ноябрь) составил 0,89 (график *г* на рис. 2), т.е. в сезон наиболее значительного прироста снежного покрова модель хорошо воспроизвела сезонную динамику его толщины.

Таким образом, в 1958 г. коэффициенты корреляции между вычисленными и измеренными значениями толщины снега в целом были выше, чем в 1959 г., однако в некоторые сезоны связи не столь однозначны. Зимой, например, коэффициенты корреляции от года к году сильно различаются. Интенсивный процесс снеготаяния, происходящий летом, в общем, хорошо воспроизводится моделью: коэффициент корреляции между вычисленными и измеренными толщинами снега за летние месяцы высокий; в обоих случаях достаточно хорошо вычислен и момент схода снега. Однако весной коэффициенты корреляции отрицательны, а на рис. 2 видно, что в то время, когда для модели характерно постепенное таяние снежного покрова, реально снег ещё продолжает накапливаться. Это означает, что в модели неточно описаны некие процессы, влияющие на интенсивность таяния снега. Объяснить данное различие, вероятно, можно приходом радиации (одного из важнейших притоков тепла для таяния снега), так как в модели используются рассчитанные её значения, а не данные наблюдений (последние, хотя и измерялись, но с перерывами и не по всем необходимым для модели составляющим). Для проверки правильности модельного

расчёта характеристик радиации мы провели сравнительный анализ значений приходящей радиации по результатам вычислений и измерений.

**Описание радиационного блока модели.** Радиация рассчитывалась с помощью радиационной модели, представляющей собой отдельный блок модели SPONSOR [15]. Данных наблюдений по радиации часто бывает недостаточно или их дискретность выше необходимой, поэтому их неудобно использовать. Хотя суточный ход радиации плавный, в зависимости от внешних факторов он может сильно меняться из-за влияния облачности, затенения горными массивами и других факторов. Поскольку ежечасных наблюдений за радиацией нет, данные интерполируются, что не всегда даёт хорошие результаты. В описанном здесь эксперименте с моделью SPONSOR использовалась радиация, рассчитанная с помощью модели, так как данных наблюдений было недостаточно. Для проверки качества такого расчёта радиации проведён сравнительный анализ рассчитанных значений суммарной радиации и данных наблюдений в те сроки, когда сравнение было возможно.

В радиационной модели прямая и рассеянная радиации рассчитываются как суточная сумма, складывающаяся из соответствующих ежечасных значений. Прямая солнечная радиация за каждый час  $S$  вычисляется по закону Бугера согласно З.И. Пивоваровой [6]:

$$S = \frac{(1-N)C_z(S_0/R^z)}{1+m(1-t_2^2)/2t_2^2},$$

$$C_z = \sin\phi\sin\sigma + \cos\phi\cos\sigma\cos(90,2618(I-12)),$$

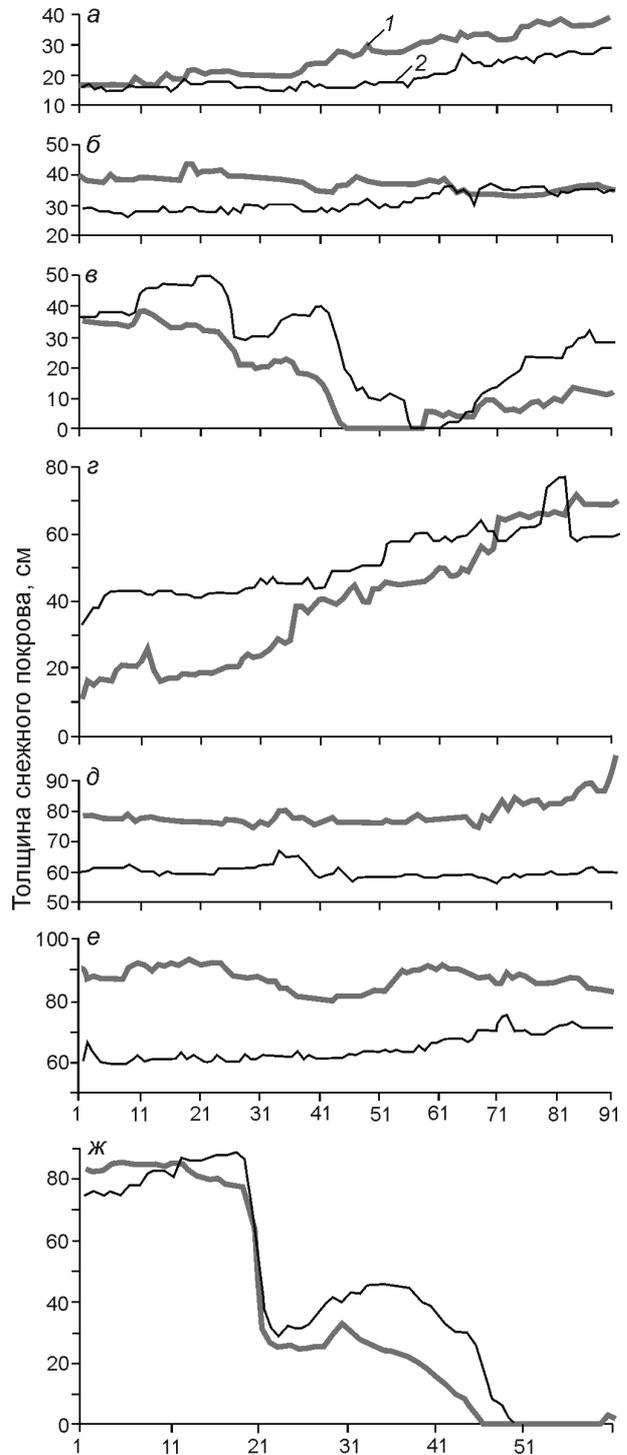
$$m = \frac{2,0016P_a}{1013(C_z + \sqrt{C_z^2 + 0,003147})},$$

где  $N$  – среднее между общей облачностью и облачностью нижнего яруса;  $C_z$  – косинус зенитного угла Солнца;  $S_0$  – солнечная постоянная;  $R$  – сезонный радиус-вектор земной орбиты;  $t_2$  – прозрачность атмосферы для  $m = 2$  на уровне моря ( $m$  – оптическая масса атмосферы);  $\phi$  – широта;  $\sigma$  – солнечное склонение (и то, и то в радианах);  $I$  – номер часа дня;  $P_a$  – атмосферное давление; параметр  $t_2$  определён для всей территории СССР (для горных районов с их вертикальным градиентом) З.И. Пивоваровой [6].

Рассеянная солнечная радиация  $D$  рассчитывается по формуле Берлаге [6]:

$$D_c = 0,38C_z(S_0 - S_c);$$

$$D = (1 - N)D_c + 0,34AN(S_c + D_c);$$



**Рис. 2.** Ряды толщины снежного покрова (по вертикальной оси, см) по данным наблюдений и по модели на куполе Чурляниса: 1 – ряд рассчитанных значений; 2 – ряд наблюдаемых значений; а – зима 1957/58 г.; б – весна 1958 г.; в – лето 1958 г.; г – осень 1958 г.; д – зима 1958/59 г.; е – весна 1959 г.; ж – лето 1959 г.; по горизонтальной оси отложены дни (сутки)

**Fig. 2.** Rows of observed and model calculated snow depth (vertical axis, cm) on the Čiurlionis ice cap:

1 – calculated data; 2 – observed data; а – winter 1957/58; б – spring 1958; в – summer 1958; г – autumn 1958; д – winter 1958/59; е – spring 1959; ж – summer 1959; horizontal axis represents day

$$A = \begin{cases} 1, & \text{если } N < 0,95 \\ \exp(-0,03P_\tau), & \text{если } N > 0,95 \end{cases}$$

где  $S_c$  – прямая солнечная радиация для ясного неба (т.е.  $S/(1 - N)$ ).

Параметр  $A$  включён в равенство для учёта эффекта толщины облаков при условиях, близких к полностью пасмурным. Толщина облаков в таких условиях, как предполагается, коррелирует с интенсивностью осадков  $P$ . Суммарная солнечная радиация – сумма прямой и рассеянной радиации ( $S + D$ ). Инфракрасная приходящая радиация рассчитывается по [13] с поправкой на облачность [12] (с уточнениями для морозных условий). Интенсивность потока  $I_d$  определяется следующим образом:

$$I_d = B\sigma\delta_a T_a^4;$$

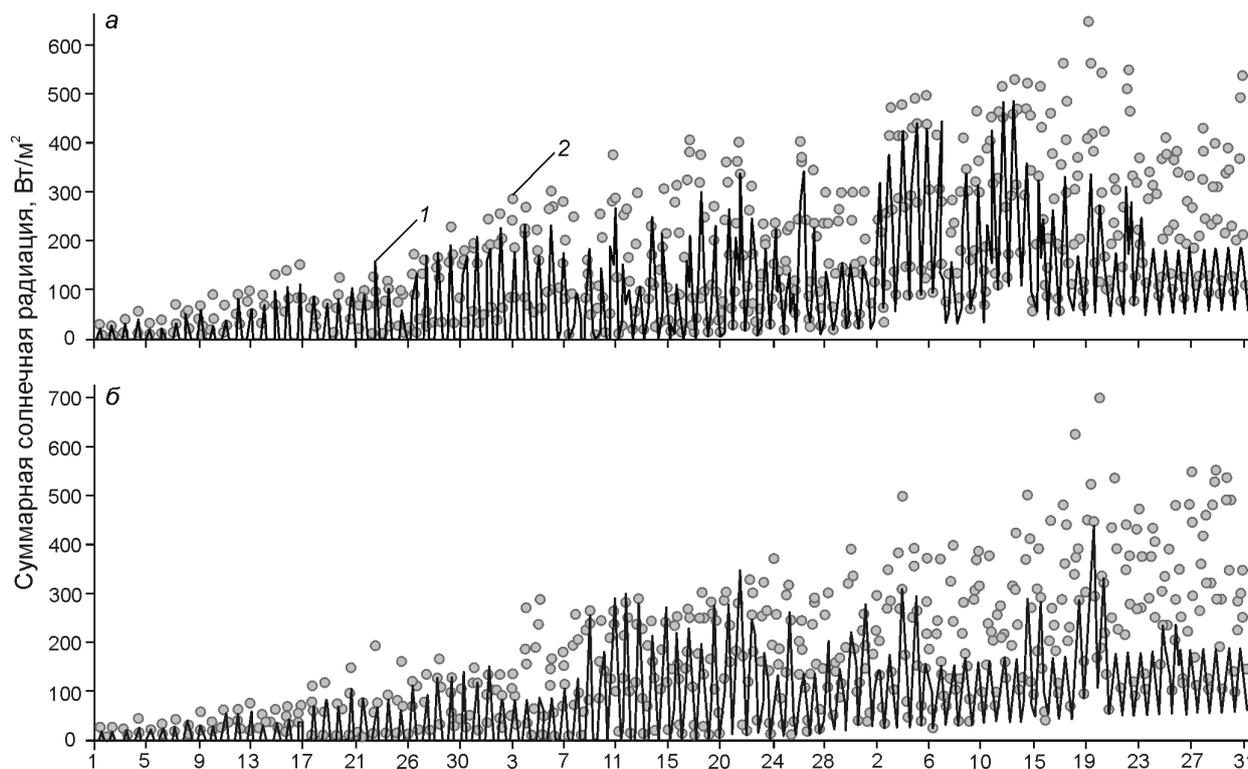
$$\delta_a = 1,24 \left( \frac{P_a}{1013} \right) \left( \frac{E_0}{T_0} \right)^{0,143};$$

$$B = \begin{cases} 1 + 0,17N^2, & T_a > 273,16 \\ 1 + 0,4N_r, & T_a < 273,16 \end{cases}$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $\delta_a$  – излучательная способность атмосферы;  $E_0$  и  $T_0$  – давление водяного пара и температура, соответственно пересчитанные на уровень моря;  $B$  – поправка на облачность;  $r$  – относительная влажность воздуха; для температур воздуха выше  $0^\circ\text{C}$  коэффициент  $B$  берётся по [12], а для морозных условий – исходя из уточнений, сделанных в Институте географии РАН и проверенных в различных точках России [15].

**Воспроизведение солнечной радиации.** Сравнительный анализ результатов расчёта суммарной радиации моделью и по данным наблюдений выполнен для весенних периодов, когда качество вычислений толщины снежного покрова в модели было невелико (по результатам моделирования снежный покров тает, в то время как по реальным данным он накапливается). Возможно, это связано с завышением расчётных значений поступающей суммарной радиации, поэтому в модели и таяние снежного покрова может быть завышено.

На рис. 3 показан ход суммарной радиации по результатам расчёта и по данным наблю-



**Рис. 3.** Суммарная солнечная радиация (вертикальная ось, Вт/м<sup>2</sup>) на куполе Чурляниса по данным измерений и вычислений:

*а* – в марте–мае 1958 г.; *б* – в марте–мае 1959 г.; 1 – рассчитанные значения; 2 – наблюдаемые

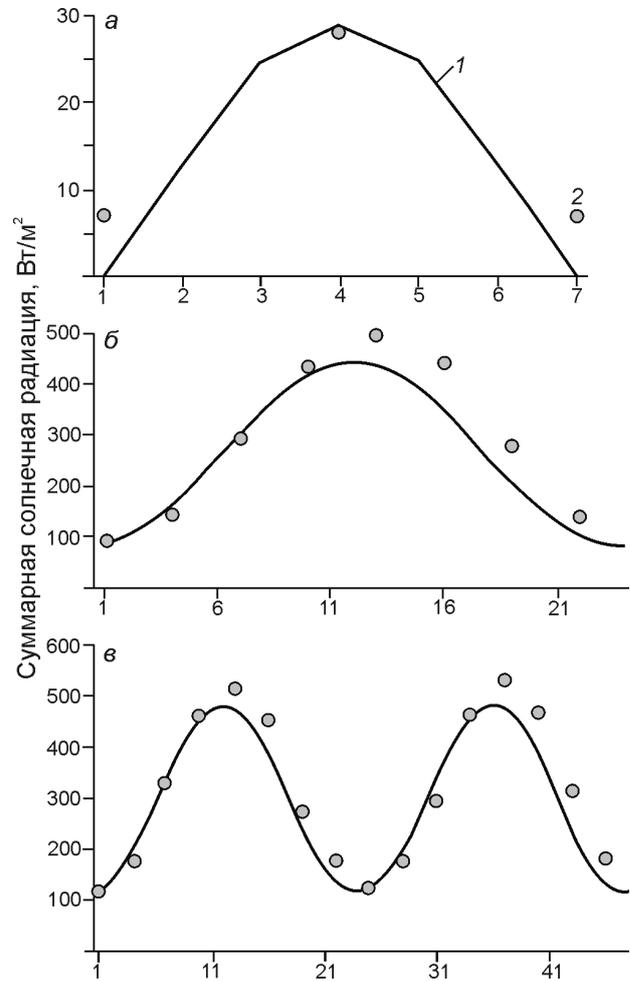
**Fig. 3.** Observed and calculated total solar radiation (vertical axis, W/m<sup>2</sup>) on the Čiurlionis ice cap:

*a* – in March–May 1958; *b* – in March–May 1959; 1 – calculated radiation data; 2 – observed

дений для весны 1958 и 1959 гг. соответственно (март–май). Данные наблюдений и рассчитанные значения суммарной радиации существенно отличаются. На обоих графиках в начале и середине весны значения расходятся не так сильно, однако в конце периода различия значительные. Анализ показал, что модель не завышает суммарную радиацию, как предполагалось ранее, а занижает её, причём в отдельные дни очень сильно. В мае различия особенно велики, вероятно, в связи с неточными данными по облачности. Для использования в модели значение облачности интерполировали на каждый час, так как по данным наблюдений этот параметр был доступен лишь каждые 6 часов. Очевидно, балл облачности может сильно отличаться даже от часа к часу, так как над территорией Земли Франца-Иосифа часто наблюдаются сильные ветры и перемены погоды. Из-за несовпадения сроков измерения облачности и радиации такие ошибки неизбежны. Отдельно рассматривать каждый такой день и исправлять ошибки невозможно из-за большого объёма данных.

Для более подробного анализа изучены сроки, в которых наблюдателями отмечалось состояние диска солнца «в квадрате», т.е. когда поблизости от солнечного диска не было никаких облаков. Весной 1958 г. было 125 сроков таких наблюдений. И в этом случае разница между данными модели и наблюдений была не так велика, как за весь период. Существуют отдельные случаи, которые можно принять за ошибку модели, но в общем рассматриваемая модель неплохо воспроизводит суммарную радиацию при таких условиях. Весной 1959 г. сроков наблюдений с состоянием диска солнца «в квадрате» было всего 57. В этот период существовала та же тенденция занижения значений суммарной радиации моделью, но, за исключением отдельных случаев, рассчитанные значения и наблюдаемые отличались незначительно.

Необходимо отметить, что значения облачности в модели идеально совпадают с данными наблюдений только четыре раза в сутки, когда эта облачность наблюдалась (1, 7, 13 и 19 часов), а в другое время между сроками вероятны расхождения, которые нельзя проверить. Для исключения ошибок, связанных с облачностью, выполнен сравнительный анализ значений радиации в безоблачные дни. На рис. 4



**Рис. 4.** Суммарная солнечная радиации на куполе Чурляниса в безоблачные дни по данным измерений и вычислений:

*a* – 2 марта 1958 г. (отсчет начинается с 10 часов утра); *б* – 5 мая 1958 г.; *в* – 12–13 мая 1958 г.; *1* – рассчитанные значения; *2* – наблюдаемые; по горизонтальной оси отложены часы

**Fig. 4.** Total solar radiation on the Ciurlionis ice cap on cloudless days:

*a* – 2 March 1958 (the first graph begins with 10 o'clock); *б* – 5 May 1958; *в* – 12, 13 May 1958; *1* – indicate calculated radiation data; *2* – observed; horizontal axis show hours

видно, что рассчитанные значения суммарной радиации и данные наблюдений практически совпадают и лишь в отдельные сроки измеренная радиация незначительно превышает расчётную. Следовательно, ошибки в расчётах радиации связаны главным образом с неточностью данных по облачности. Незначительное расхождение вычисленной и измеренной радиации при ясном небе можно объяснить небольшим занижением коэффициента прозрачности атмосферы, что легко исправить при дальнейших расчётах.

### Заключение

В арктических районах при численном моделировании снежного покрова необходимо учитывать характерное для таких регионов метелевое испарение. При использовании формулы А.К. Дюнина для метелевого испарения на ледниковом куполе Чурляниса (о. Гукера, Земля Франца-Иосифа) значительно улучшается качество расчётов толщины снежного покрова. Толщина снежного покрова, вычисленная с учётом метелевого испарения, существенно ближе к данным измерений, чем без её учёта, так как на рассматриваемой территории часто наблюдаются сильные ветры, которые поднимают свежавывающийся снег в воздух, после чего он испаряется и уже не возвращается на подстилающую поверхность. Некоторые расхождения в рассчитанных и измеренных значениях толщины снежного покрова связаны в основном с неточностями в наблюдениях за осадками, а также с ошибками расчёта радиации, главным образом в результате существующих неточностей при измерениях облачности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 11-05-00573.

### Литература

1. Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: СО АН СССР, 1963. 378 с.
2. Дюнин А.К. В царстве снега. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.
3. Котляков В.М. Снежный покров Антарктиды и его роль в современном оледенении материка: Результаты исследований по программе Международного геофизического года. IX раздел программы МГГ, гляциология, № 7. М.: изд. АН СССР, 1961. 246 с.
4. Кренке А.Н., Воронина Л.С. Основные метеорологические наблюдения // МГИ: Земля Франца-Иосифа. М.: изд. Межведомственного геофизического комитета, 1963. 130 с.
5. Кренке А.Н., Псарева Т.В. Снежный покров // МГИ: Земля Франца-Иосифа. М.: изд. Межведомственного геофизического комитета, 1963. 152 с.
6. Пивоварова З.И. Радиационные характеристики климата СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 335 с.
7. Чернявский А.С. Снежные заносы и борьба с ними // Железнодорожное дело. 1894. № 25–27. 39 с.
8. Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю. Модель снежного покрова с учётом слоистой структуры и её сезонной эволюции // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 69–79.
9. Armstrong R.L., Brun E. (Eds.) Snow and Climate. Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008. 222 p.
10. Déry S.J., Yau M.K. Simulation Of Blowing Snow In The Canadian Arctic Using A Double-Moment Model // Boundary-Layer Meteorology. 2001. № 99 (2). P. 297–316.
11. Etchevers P., Martin E., Brown R., Fierz C., Lejeune Y., Bazile E., Boone A., Dai Y.-J., Essery R., Fernandez A., Gusev Y., Jordan R., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova O., Pyles R.D., Schlosser A., Shmakin A.B., Smirnova T.G., Strasser U., Verseghy D., Yamazaki T., Yang Z.-L. Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project) // Annals of Glaciology. 2004. V. 38. P. 150–158.
12. Geiger R. The climate near the ground. Harvard: Harvard Univ. Press, 1965. 611 p.
13. Marks D., Dozier J. A clear-sky longwave radiation model for remote alpine areas // Arch. Meteorol., Geophys. und Bioclimatol. 1979. B 27. № 2–3. P. 159–187.
14. Rutte N., Essery R., Pomeroy J., Altimir N., Andreadis K., Baker I., Barr A., Bartlett P., Boone A., Deng H., Douville H., Dutra E., Elder K., Ellis C., Feng X., Gelfan A., Goodbody A., Gusev Y., Gustafsson D., Hellstrom R., Hirabayashi Y., Hirota T., Jonas T., Koren V., Kuragina A., Lettenmaier D., Li W.-P., Luce C., Martin E., Nasonova O., Pumpanen J., Pyles R.D., Samuelsson P., Sandells M., Schadler G., Shmakin A., Smirnova T.G., Stahli M., Stockli R., Strasser U., Su H., Suzuki K., Takata K., Tanaka K., Thompson E., Vesala T., Viterbo P., Wiltshire A., Xia K., Xue Y., Yamazaki T. Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2) // Journ. of Geophys. Research. 2009. V. 114. D06111. doi:10.1029/2008JD011063.
15. Shmakin A.B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // Global and Planetary Change. 1998. V. 19. № 1–4. P. 49–62.
16. Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // Journ. of Glaciology. 1997. № 43 (143). P. 26–41.

### Summary

Results obtained by simulating snow characteristics with a numerical model of surface heat and moisture exchange SPONSOR are presented. The numerical experiments are carried out for Franz Josef Land with typical Arctic climate conditions. The blizzard evaporation parameter is shown to have great influence on snow depth on territories with high wind speed. This parameter significantly improves the simulation quality of the numerical model. Some discrepancies between evaluated and observed snow depth values can be explained by inaccuracies in precipitation measurements (at least in certain cases) and errors in calculations of incoming radiation, mostly due to low accuracy in the cloudiness observations.