

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 556.124.2

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-401>

Расчёты формирования снежного покрова на основе модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP

© 2019 г. Е.М. Гусев*, О.Н. Насонова

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*sowaso@yandex.ru

Simulating of snow cover formation by the model of interaction between the land surface and the atmosphere (SWAP)

E.M. Gusev*, O.N. Nasonova

Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*sowaso@yandex.ru

Received May 20, 2018 / Revised November 28, 2018 / Accepted 22 March, 2019

Keywords: *ESM-SnowMIP reference sites, model of interaction between the land surface and the atmosphere (SWAP), models of snow processes, snow storage, the River Lena basin, the River Ob basin.*

Summary

In framework of the project «The Earth system Models – Snow Models Intercomparison Project» (ESM-SnowMIP), calculations of snow storages were carried out on ten experimental sites organized for long-term monitoring of the snow cover variability in various regions of the globe. The calculation method is based on the physical and mathematical description of heat and moisture exchange processes occurring within the system «ground water – soil – vegetation cover/snow cover – surface layer of the atmosphere», and it is implemented in the form of the model of interaction between the land surface and the atmosphere (SWAP). The model was developed at the Institute of water problems (IWP) of Russian Academy of Sciences. The model makes possible to calculate components of water and heat balances and different characteristics of the hydrological regime of terrestrial ecosystems and river basins having different spatial scales and located in different natural conditions. Good quality of reproduction of the snow storages variability on all considered sites is reached that allows consideration of the SWAP model as one of the best models of the snow cover formation. Thus, the SWAP model has a sufficiently optimal degree of complexity of the algorithm for reproducing the dynamics of snow cover, which is necessary and sufficient in global and regional hydrological models describing formation of the water balance of the land in the cold regions of the planet, and can be used to create scenario forecasts of snow dynamics (as the important part of the cryosphere). This conclusion is verified by the results of using the SWAP model to reproduce long-term variability of snow storages in basins of the River Lena and the River Ob (with its tributary Irtysh) which are the two largest rivers of the Russian Federation. The calculated and measured characteristics of snow cover dynamics for these basins are shown to be in good agreement.

Citation: Gusev E.M., Nasonova O.N. Simulating of snow cover formation by the model of interaction between the land surface and the atmosphere (SWAP). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 59 (2): 167–181. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-401>.

Поступила 20 мая 2018 г. / После доработки 28 ноября 2018 г. / Принята к печати 22 марта 2019 г.

Ключевые слова: *бассейны рек Лены и Оби, модели формирования снежного покрова, модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP, снегозапасы.*

Расчёты снегозапасов на десяти экспериментальных площадках в разных районах земного шара показали, что модель SWAP входит в число лучших мировых моделей формирования снежного покрова. Расчёты по этой модели многолетней динамики снегозапасов в бассейнах рек Лены и Оби (с её притоком р. Иртыш) подтвердили вывод о способности модели SWAP адекватно воспроизводить формирование снегозапасов в крупных речных бассейнах.

Введение

Снег – важнейший криосферный компонент биосферы. Особая роль снега на планете обусловлена его физическими свойствами, а именно: высоким альбедо и, как правило, низкой теплопроводностью. Снежный покров в районе высоких и средних широт осуществляет долговременную регуляцию составляющих водного баланса рассматриваемой территории, играя роль водного буфера, который накапливает атмосферные осадки зимой и теряет их в процессе весеннего снеготаяния, определяя при этом специфический для данных широт годовой ход составляющих водного баланса. Кроме того, снежный покров выступает регулятором и в отношении климатической системы Земли, отражая значительную часть приходящей солнечной радиации в атмосферу, а также поддерживая в течение периодов снеготаяния нулевую температуру подстилающей поверхности. Дополнительная роль снежного покрова в гидрологическом цикле связана также с тем, что от его толщины зависит степень промерзания сезонно-промерзающих почв, которая влияет на их инфильтрационные свойства, а значит и на разделение поступающих на её поверхность в период весеннего снеготаяния талых вод и осадков между поверхностным стоком и пополнением почвенных влагозапасов.

Наблюдаемые глобальные и региональные (преимущественно в Северном полушарии) тренды продолжительности и площади залегания снежного покрова за последние десятилетия неизменно отрицательны и связаны с тенденцией глобального потепления на планете [1–4]. Поэтому всё более актуальными становятся модели формирования снежного покрова, на основе которых можно делать прогнозы динамики данного элемента криосферы в будущем. В связи с этим в 2013 г. по инициативе Всемирной программы исследований климата (ВПИК) был организован международный проект «The Earth System Models – Snow Models Intercomparison Project» (ESM-SnowMIP), который входит во ВПИК в рамках «Grand Challenge Melting Ice & Global Consequences». Проект призван обеспечить быстрый прогресс в понимании процессов, связанных со снегом, и систематизировать полученные знания в глобальных и региональных климатических и гидрологических моделях в контексте

происходящих глобальных изменений, характеризующихся быстрым уменьшением площади и массы криосферы. Авторы настоящей статьи – участники проекта ESM-SnowMIP [5].

Первая задача проекта ESM-SnowMIP была связана с оценкой современного состояния снежных моделей в разных пространственных масштабах – от локальной экспериментальной площадки до регионального и глобального масштабов. В локальном масштабе наличие долгосрочных высококачественных наблюдений за характеристиками снежного покрова и метеорологическими параметрами предоставляет больше возможностей для оценки существующих моделей формирования снегозапасов в разных климатических условиях по сравнению с масштабами речного бассейна или региона. В связи с этим *первая цель настоящей статьи* – демонстрация работоспособности методики расчёта формирования снежного покрова, используемой в модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP [6] в различных природных условиях в локальном масштабе. Методика была разработана авторами статьи раньше, а во время участия в ESM-SnowMIP в неё были внесены небольшие уточнения. Кроме того, работа имеет и *вторую цель* – проверить возможность применения указанной методики для моделирования формирования снегозапасов в масштабах крупного речного бассейна.

Методика расчётов

Участвующие в проекте ESM-SnowMIP 26 модельных блоков [5], которые описывают формирование снежного покрова и включены в различные гидрологические и климатические модели, имеют разную степень сложности – от очень простых однослойных моделей снежного покрова с заданными физическими свойствами снега до более сложных многослойных моделей, воспроизводящих такие процессы, как уплотнение снежного покрова, перенос жидкой воды в нём, фазовые переходы воды в снеге, перехват твёрдых осадков растительностью с последующей их трансформацией и т.д. Основным методическим инструментом, используемым для расчёта динамики характеристик снежного покрова, послужила модель взаимодействия

подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP, разработанная в Институте водных проблем РАН [6]. В её основу положено физико-математическое описание процессов тепло- и влагообмена, происходящих в системе грунтовые воды – почва – растительный покров/снежный покров – приземный слой атмосферы. Модель позволяет рассчитывать составляющие водного и теплового балансов, различные характеристики гидрологического режима наземных экосистем и речных бассейнов, имеющих разные пространственные масштабы и находящихся в различных природных условиях.

В качестве входных данных используются метеорологические параметры, которые можно получить из данных наблюдений, продукты «ре-анализа», различные прогнозы как с учётом возможного изменения климата, так и без него. Кроме метеорологических данных, обеспечивающих верхнее граничное условие для расчётов по модели SWAP, к необходимой информации относятся также данные, идентифицирующие исследуемый объект: параметры растительного покрова и почвы. В случае значительного по пространственным масштабам и неоднородного по природным условиям и характеристикам подстилающей поверхности объекта (большой речной бассейн, регион, континент и т.д.) выполняется переход от модели локального масштаба к её мезомасштабному аналогу (upscaling, регионализация) [6]. Выходными переменными модели служат значения различных составляющих водного и теплового балансов, а также показатели динамики водного и теплового режимов рассматриваемой системы. Выходных переменных может быть до нескольких десятков.

В отношении воспроизведения динамики снежного покрова SWAP представляет собой модель, отличительные особенности которой – её простота в сочетании с достаточной физической обоснованностью и рациональностью с точки зрения используемых модельных средств. При этом рациональность обусловлена применением преимущественно аналитических методов решения систем уравнений (в то время как в большинстве существующих моделей используются численные методы) и стремлением к сокращению, по мере возможности, числа параметров модели. Модель описывает формирование снеготопливных запасов на подстилающей поверхности суши

как для случая низкой растительности (полевые участки), которая в зимнее время находится под снегом, так и для высокой растительности (лесные участки), когда снежный покров формируется под пологом леса.

На рис. 1 приведён пример моделируемых в SWAP основных процессов, связанных с формированием снежного покрова для последнего более сложного объекта (хвойного леса). Здесь мы не будем описывать параметризацию процессов, указанных на рис. 1, и общего алгоритма расчёта формирования снежного покрова, так как они достаточно подробно изложены в работах [6–8], а рассмотрим только один из аспектов используемой в SWAP методики, связанный с расчётом такой важной характеристики, как альbedo поверхности снежного покрова на открытых участках и под пологом древостоя α_{sn} . Алгоритм оценки именно этой характеристики был немного изменён в настоящей работе.

Альbedo снежного покрова зависит от многих факторов: спектрального состава солнечной радиации, высоты Солнца над горизонтом, состояния снежного покрова (его плотности, влажности, загрязнённости) [9]. Снег неравномерно отражает солнечную радиацию в различных областях её спектра: в крайних областях альbedo меньше, чем в видимой части. Комбинация действия указанных факторов может быть различна при формировании снежного покрова в регионах с разными природными условиями. В работах [10, 11] дан обзор моделей, которые учитывают изменение альbedo в зависимости от возраста снега, диаметра снежных зёрен, зенитного угла Солнца, а также от плотности снега ρ_{sn} . Тем не менее во многих гидрологических и климатических моделях при описании динамики снежного покрова ограничиваются параметризацией α_{sn} в виде функции плотности снега. Использование аппроксимации $\alpha_{sn}(\rho_{sn})$ оправдывается тем, что плотность снега, как правило, коррелирует с его возрастом, зернистостью и загрязнённостью. В модели SWAP также используется приближённая параметризация альbedo снежного покрова в виде

$$\alpha_{sn} = a - b(\rho_{sn} - 0,1)^3, \quad (1)$$

где a и b – эмпирические параметры; плотность снега ρ_{sn} – рассчитываемая переменная, г/см³.

Зависимость (1) получена нами по данным наблюдений за альbedo α_{sn} и плотностью ρ_{sn} снега

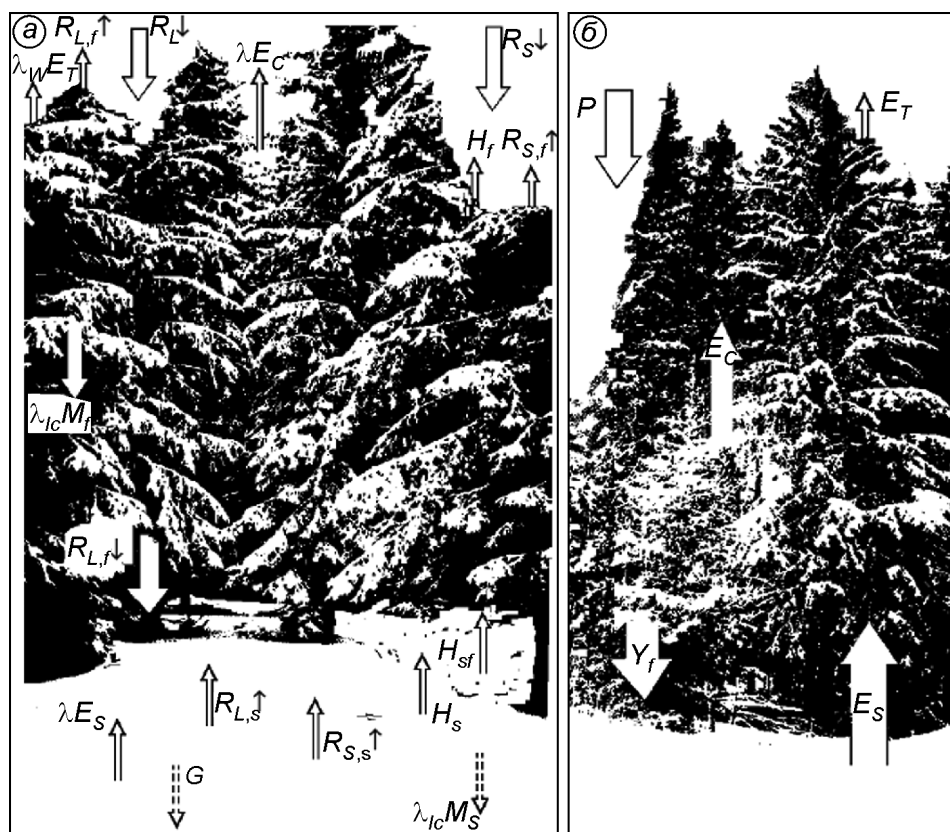


Рис. 1. Схематизация основных процессов тепло- (а) и влагообмена (б) в зимнем хвойном лесу в модели SWAP [6]. Здесь $R_S\downarrow$ и $R_L\downarrow$ – входящие потоки коротко- и длинноволновой радиации; $R_{L,f}\downarrow$ – длинноволновая радиация, направленная от кроны деревьев к лесному пологу; $R_{L,s}\uparrow$ – длинноволновая радиация, направленная от полога леса в атмосферу; $R_{S,s}\uparrow$ – солнечная радиация, отражённая пологом леса; $R_{L,f}\uparrow$ – длинноволновая радиация, направленная от кроны деревьев в атмосферу; $R_{S,f}\uparrow$ – солнечная радиация, отражённая кронами деревьев; H_f – турбулентные потоки тепла и водяного пара, исходящие от кроны деревьев; H_s и H_{sf} – турбулентные потоки тепла, направленные в атмосферу и к кронам деревьев соответственно; G – кондуктивный поток тепла от поверхности снежного покрова в почву; λE_C , $\lambda_w E_T$, λE_s , $\lambda_{Ic} M_f$, $\lambda_{Ic} M_s$ – скрытые потоки тепла, связанные с испарением перехваченных осадков, транспирацией, сублимацией снега, снеготаянием на кронах деревьев, снеготаянием под пологом леса соответственно ($\lambda = \lambda_{Ic} + \lambda_w$ – удельная теплота сублимации снега, равная сумме скрытой теплоты снеготаяния λ_{Ic} и скрытой теплоты испарения воды λ_w); P – осадки; E_T – транспирация; E_C – испарение перехваченных кронами деревьев осадков; E_s – сублимация снега под пологом леса; Y_f – снеготаяние на кронах деревьев

Fig. 1. Scheme of the main processes of heat (a) and water (б) exchange within a boreal forest during a winter season in the SWAP model.

$R_S\downarrow$ and $R_L\downarrow$ – incoming shortwave and longwave radiation; $R_{L,f}\downarrow$ – longwave radiation directed from crowns to forest floor; $R_{L,s}\uparrow$ – longwave radiation directed from crowns to the atmosphere; $R_{S,s}\uparrow$ – solar radiation reflected by forest floor; $R_{L,f}\uparrow$ – longwave radiation directed from crowns to the atmosphere; $R_{S,f}\uparrow$ – solar radiation reflected by crowns; H_f – turbulent heat and water vapour fluxes generated by crowns; H_s and H_{sf} – turbulent heat fluxes directed to the atmosphere and crowns; respectively; G – ground heat flux; λE_C ; $\lambda_w E_T$; λE_s ; $\lambda_{Ic} M_f$; $\lambda_{Ic} M_s$ – latent heat fluxes related to evaporation of intercepted precipitation, transpiration, snow sublimation, snow melt on crowns, snow melt on forest floor, respectively ($\lambda = \lambda_{Ic} + \lambda_w$ – specific heat of sublimation equaled to the sum of latent heat of snow melt λ_{Ic} and latent heat of vaporization of water λ_w); P – precipitation; E_T – transpiration; E_C – evaporation of precipitation intercepted by vegetation; E_s – snow sublimation on forest floor; Y_f – water yield from snow on crowns

в течение 18-летнего периода (1966–1983 гг.) на травянистом участке Валдайской водно-балансовой станции, отличающейся большой полнотой измерений. При этом численные значения параметров a и b составили соответственно 0,83 и 22.

Полученная параметризация $\alpha_{sn}(\rho_{sn})$ использована авторами во многих работах и для раз-

личных объектов [например, 12–14]. При этом сопоставление смоделированных характеристик снежного покрова с данными измерений показало вполне удовлетворительные результаты. Тем не менее, авторы понимают, что эмпирические параметры в формуле (1) вряд ли универсальны для всех регионов Земли, поскольку спектр сол-

Таблица 1. Использованные в работе экспериментальные площадки для многолетнего наблюдения за динамикой снежного покрова [5]

Экспериментальная площадка, (код площадки)	Северная широта, градусы	Долгота, градусы	Высота над ур. моря, м	Расчётный период, годы	Климат	Описание объекта (литература)
BERMS* Old Aspen, Canada (oas)	53.63	106.20 з.д.	600	1997–201	Бореальный,	Bartlett et al. (2006)
BERMS* Old Black Spruce, Canada (obs)	53.99	105.12 з.д.	629			
BERMS* Old Jack Pine, Canada (ojp)	53.92	104.69 з.д.	579			
Col de Porte, France (cdp)	45.30	5.77 в.д.	1325	1994–2014	Альпийский	Morin et al. (2012)
Reynolds Mountain East, USA (rme)	43.06	116.75 з.д.	2060	1988–2008		Reba et al. (2011)
Sapporo, Japan (sap)	43.08	141.34 в.д.	15	2005–2015	Морской	Niwano et al. (2012)
Senator Beck, USA (snb)	37.91	107.73 з.д.	3714	2005–2015	Альпийский	Landry et al. (2014)
Sodankylä, Finland (sod)	67.37	26.63 в.д.	179	2007–2014	Арктический	Essery et al. (2016)
Swamp Angel, USA (swa)	37.91	107.71 з.д.	3371	2005–2015	Альпийский	Landry et al. (2014)
Weissfluhjoch, Switzerland (wfj)	46.83	9.81 в.д.	2540	1996–2016		WSL (2017)

нечного излучения, зависящий от зенитного угла Солнца, степень открытости поверхности снега, увлажнённость снежного покрова, определяемая во многом климатическими условиями, степень чистоты поверхности снега и другие факторы, влияющие на альбедо снега, могут быть связаны с региональными особенностями рассматриваемых объектов. Именно поэтому параметры *a* и *b* могут отличаться для разных регионов. Указанные параметры желательнее корректировать по имеющимся (пусть и не в очень большом объёме) данным измерений характеристик снежного покрова для каждого конкретного объекта. Такая корректировка и была сделана в настоящей работе для каждой из десяти экспериментальных площадок, предложенных в качестве модельных объектов в проекте ESM-SnowMIP и расположенных в разных регионах земного шара. Продолжительность периода корректировки, как правило, была небольшой – 1–2 года (максимум семь лет), велась она вручную и весьма приближённо по данным, которые удавалось найти в литературных источниках [15–21].

После указанной корректировки значений параметров в формуле (1) были выполнены расчёты по модели SWAP динамики снегозапасов с одночасовым временным шагом для многолетнего периода (от 8 лет до 21 года в зависимости от имеющихся данных) по десяти экспериментальным площадкам. Информацию о входных метеорологических элементах для каждого объекта обеспечивали организаторы проекта ESM-SnowMIP [22]. Характеристики

почвы и растительного покрова задавались на основе качественного описания исследуемых объектов [22], а также с использованием информации из глобальной базы данных проекта GSWP-2 [23, 24].

Исследуемые локальные объекты

Как уже отмечалось, к локальным объектам исследования отнесены десять выбранных в проекте ESM-SnowMIP экспериментальных площадок, предназначенных для многолетнего наблюдения за динамикой снежного покрова в различных местах земного шара (табл. 1) [5]. Районы расположения площадок отличаются природными условиями: климатом (бореальный, морской, арктический, альпийский), типом почв, высотой над уровнем моря, поверхностным покровом (от практически оголённой почвы на площадках Senator Beck и Weissfluhjoch до хвойных и лиственных лесов в BERMS). Поэтому их совокупность позволяет выяснить возможности модели SWAP по воспроизведению динамики характеристик снежного покрова в широком спектре природных условий. Поскольку данная работа выполнялась в рамках проекта ESM-SnowMIP, аналогичные расчёты были проведены с использованием ещё 25 моделей, воспроизводящих формирование снежного покрова и разработанных исследователями 14 стран (модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой, гидрологические мо-

Таблица 2. Модели, с помощью которых проводились расчёты формирования снежного покрова для экспериментальных площадок ESM-SnowMIP* [5]

Модель	Тип модели
BCC_AVIM	LSS в BCC-ESM
CABLE	LSS в ACCESS
CRHM	Гидрологическая модель
CLASS	LSS в CanESM
CLM5	LSS в CESM
CoLM	LSS в BNU-ESM and CAS-ESM
Crocus	Физическая модель формирования снежного покрова
ecearth	LSS в EC-EARTH
ESCIMO	Модель энергетического баланса снежного покрова
ESCROC	Мультифизическая ансамблевая система формирования снежного покрова (35-членный ансамбль)
FSM	
htessel	LSS в системе оперативных прогнозов ECMWF
htesselML	LSS в исследовательской системе прогнозов ECMWF
ISBA-ES	LSS в CNRM-CM
ISBA-MEB	
JSBACH	LSS в MPI-ESM
JSBACH3_PF	
JULES	LSS в UKESM
MATSIRO	LSS в MIROC
MOSES	LSS в HadCM3
ORCHIDEE-E	LSS в IPSL-CM
ORCHIDEE-I	
RUC	LSS в в системе оперативных прогнозов NOAA/NCEP
SMAP	Физическая модель формирования снежного покрова
SNOWPACK	
SPONSOR	Гидрологическая модель
SWAP	LSS
VEG3D	Модель формирования режима почвы и растительного покрова

*LSS – Land Surface Scheme.

дели, физико-математические модели формирования снежного покрова и т.д.) (табл. 2).

Полученные результаты моделирования снежного покрова на экспериментальных площадках

На рис. 2. представлены полученные на основе модели SWAP результаты многолетнего моделирования динамики снеготолщины SWE для указанных в табл. 1 экспериментальных площадок.

Здесь же приведены и данные полевых наблюдений, любезно предоставленные организаторами ESM-SnowMIP. Видно, что соответствие рассчитанных с помощью модели SWAP и измеренных снеготолщин для всех рассмотренных площадок достаточно хорошее. Этот факт подтверждается и проделанным организаторами проекта ESM-SnowMIP сравнительным анализом качества воспроизведения динамики снеготолщин всеми участвующими в ESM-SnowMIP моделями (см. табл. 2). На рис. 3. приведены среднеквадратические ошибки $RMSE_n$ смоделированных SWE для каждой модели и для каждой площадки. При этом ошибки нормированы на стандартное отклонение измеренных SWE для рассматриваемой площадки. Значение $RMSE_n > 1$ означает, что для этой площадки соответствующая модель воспроизводит динамику измеренных SWE не лучше простого среднего по расчётному периоду значения наблюдаемых снеготолщин. Чёрные точки на рис. 3 соответствуют осреднённой по ансамблю моделей динамике снеготолщин.

На рис. 3, а участвующие в проекте ESM-SnowMIP модели проранжированы по $RMSE_n$, осреднённой для соответствующей модели по всем площадкам. Как видно, модель SWAP находится на третьем месте из 26. На рис. 3, б представлены ошибки $RMSE_n$ всех моделей, полученные при расчётах SWE на разных площадках (коды площадок см. в табл. 1). Ошибки расчёта по модели SWAP (серые кружки) не превышают единицу на всех площадках и в основном близки к минимальным. Данные результаты указывают на вполне удовлетворительное качество воспроизведения динамики снеготолщин моделью SWAP для участков с разными природными условиями. Это позволяет считать, что модель SWAP отличается более или менее оптимальной степенью сложности алгоритма воспроизведения динамики снежного покрова, необходимой и достаточной в глобальных и региональных гидрологических моделях, описывающих формирование составляющих водного баланса суши в холодных регионах планеты. Она может использоваться при получении сценарных прогнозов изменения динамики снеготолщин (как важной части криосферы) для участков суши в различных природных условиях. Для подтверждения этого вывода, связанного со второй целью работы, приведём два примера использования

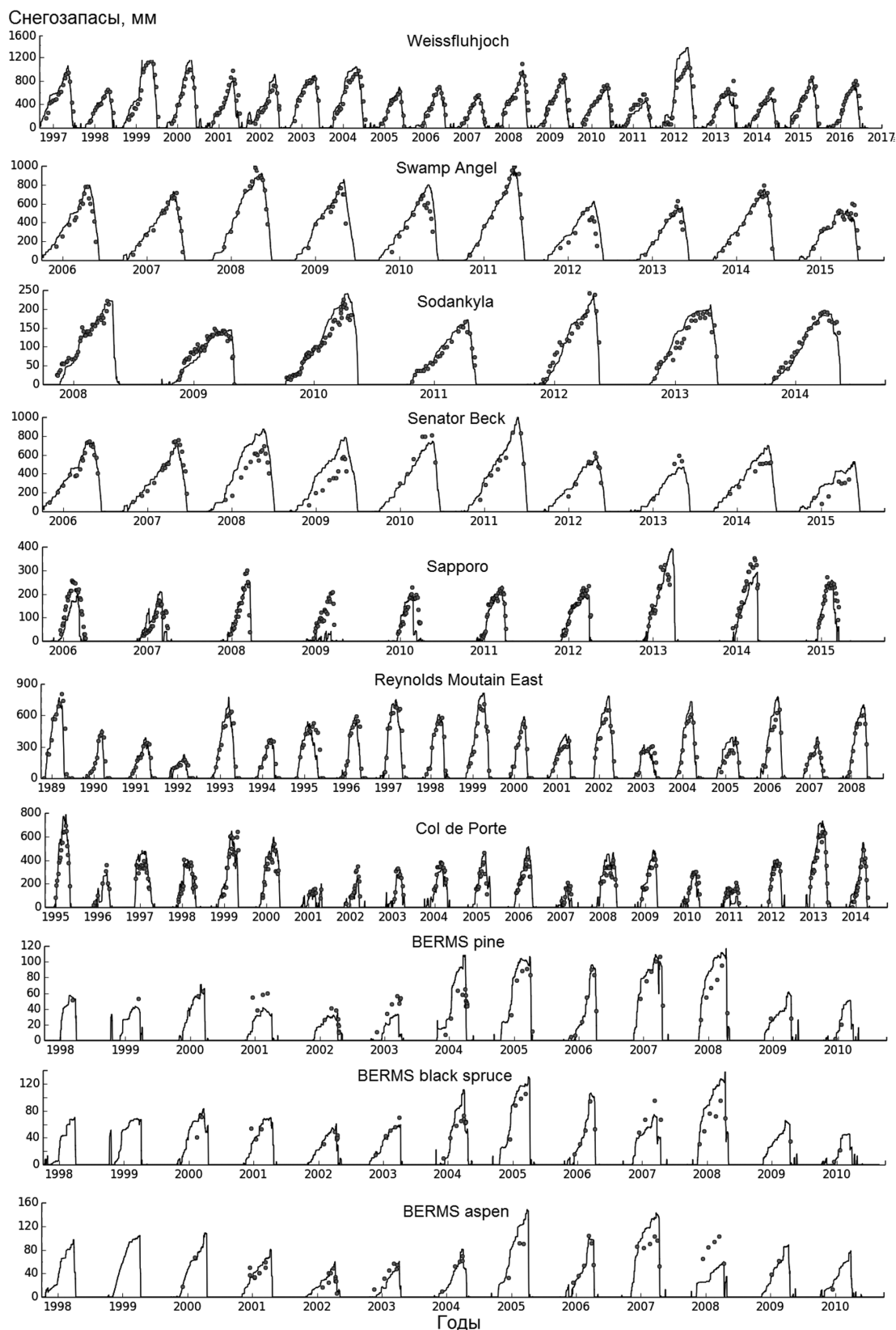


Рис. 2. Динамика измеренных (точки) и рассчитанных с использованием модели SWAP (линии) снегозапасов на указанных в табл. 1 экспериментальных площадках

Fig. 2. The dynamics of the measured (points) and modeled by SWAP (lines) snowpack on the experimental sites (see Table 1)

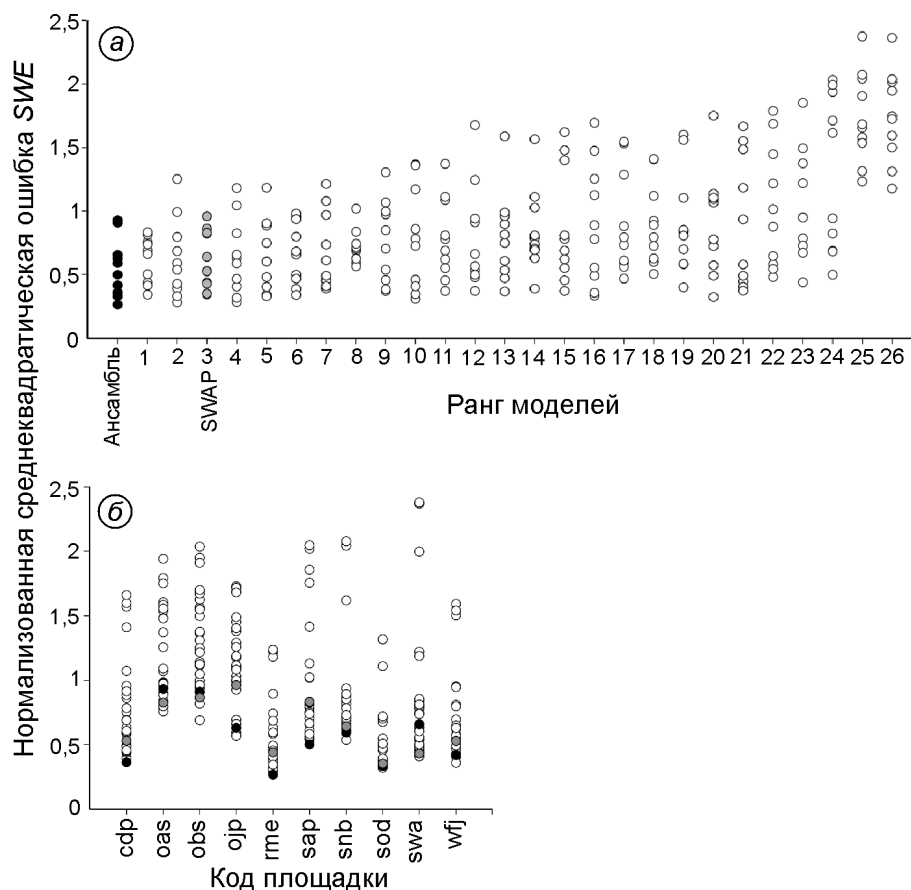


Рис. 3. Нормализованные среднеквадратические ошибки расчёта *SWE* для десяти экспериментальных площадок ESM-SnowMIP и 26 моделей (серые кружки для модели SWAP, пустые – для остальных моделей), а также для осреднённой по ансамблю моделей динамики *SWE* (чёрные кружки) [5].
a – модели ранжированы по погрешности, осреднённой по всем площадкам; *b* – представлены ошибки расчёта для каждой модели, полученные на разных площадках (коды площадок см. в табл. 1)

Fig. 3. The normalized root mean square error of the calculation of *SWE* for 10 pilot sites ESM-SnowMIP and 26 models (grey circles for the SWAP model, empty for all the other models), and for the dynamics of *SWE* averaged over the ensemble of models (black circles) [5].
a – the models are ranked by the error averaged over all sites; *b* – errors for all models for different sites (see Table 1 for site codes)

модели SWAP для воспроизведения многолетней динамики снеготазов на территории двух крупных речных бассейнов.

Расчёты динамики снеготазов на территории бассейнов рек Лены и Оби

Расчёты многолетней динамики снеготазов на основе модели SWAP были выполнены для бассейнов двух крупнейших рек Российской Федерации – Лены и Оби (с её притоком Иртышом). Речные бассейны были схематизированы в виде совокупности ячеек пространственной сетки с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (рис. 4), соединён-

ных гидрографической сетью. Бассейн р. Лена до створа Столб представлен совокупностью 395 ячеек, Обь-Иртышский бассейн – совокупностью 441 ячейки. Для каждой ячейки рассчитывалась площадь и моделировались различные характеристики гидрологического режима, в том числе и характеристики снежного покрова.

Необходимое для расчётов информационное обеспечение модели SWAP включало в себя заданную для каждой расчётной ячейки приземную трехчасовую метеорологическую информацию (температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, атмосферные осадки, а также значения приходящих потоков длинно- и коротковолновой радиации)

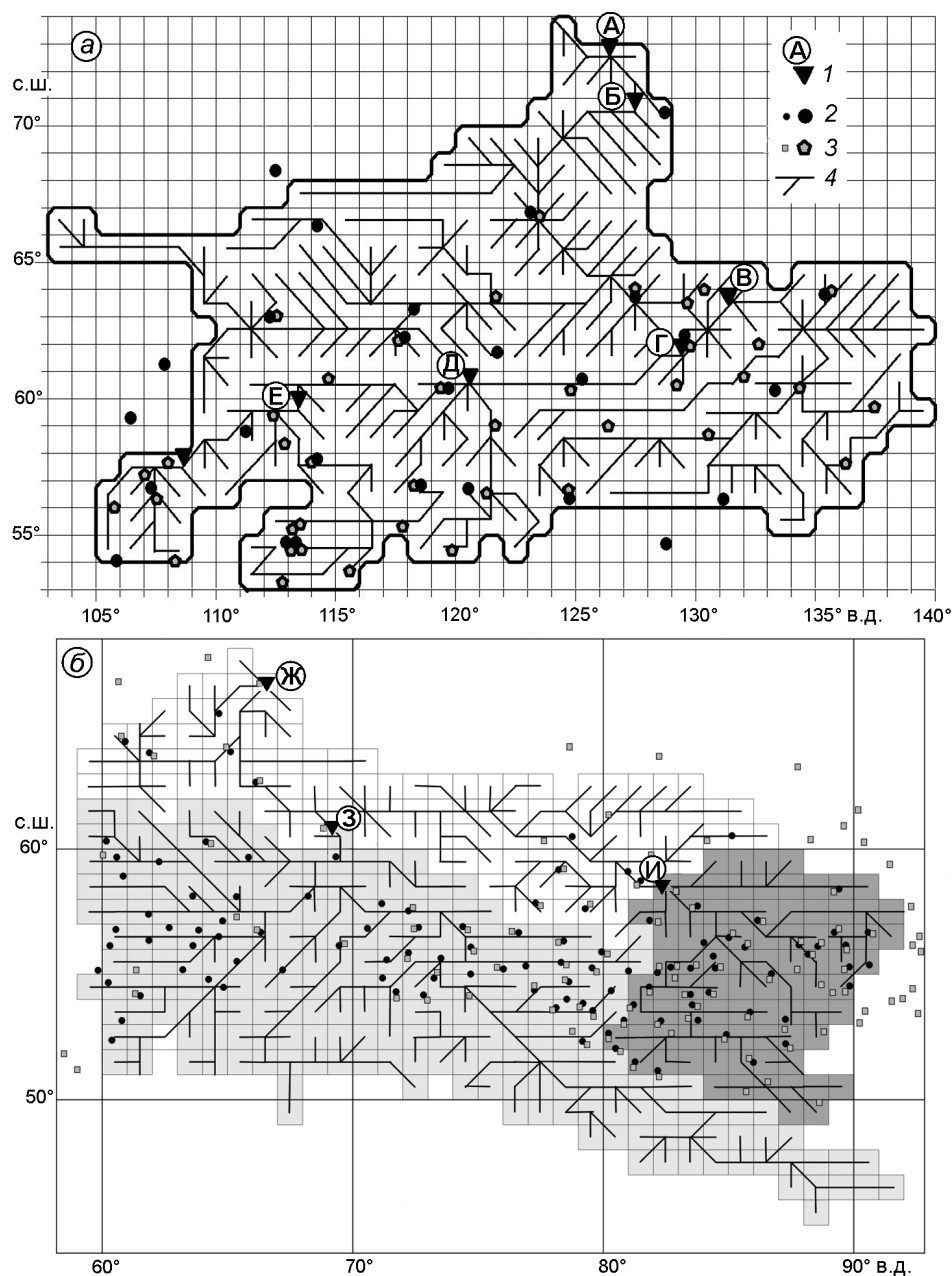


Рис. 4. Схематизация бассейнов рек Лены [14] (а), Оби (б) и их речных сетей.

1 – стокосые станции: Столб (А), Кузур (Б), Верхоянский перевоз (В), Табага (Г), Солянка (Д), Бодайбо (Е), Салехард (Ж), Ханты-Мансийская (З), Колпашево (И); 2 – метеорологические станции; 3 – снегомерные станции; 4 – речная сеть

Fig. 4. Schematization of the Lena R. [14] (a), Ob' R. (b) basins and their river network.

1 – streamflow gauges: Stolb (A), Kuzur (B), Verkhoyanskii perevoz (B), Tabaga (Г), Solyanka (Д), Bodaibo (E), Salekhard (Ж), Khanty-Mansiyskaya (З), Kolpashevo (И); 2 – meteorological stations; 3 – snow gauges; 4 – river network

с 1967 по 1981 г. для бассейна р. Лена и с 1967 по 2000 г. для Обь-Иртышского бассейна, а также параметры подстилающей поверхности: почвы, растительного покрова, топографические характеристики бассейна. В данной работе метеорологическая информация получена на основе дан-

ных наблюдений метеорологических станций (значения приходящих потоков коротко- и длинноволновой радиации рассчитывались по данным стандартных метеорологических измерений по методике, приведённой в работах [6, 14]). Значения метеорологических элементов, характери-

стик растительного покрова, параметров почвы и т.д. интерполировались в центры расчётных ячеек бассейнов с использованием модифицированной процедуры кригинга [6].

Параметры подстилающей поверхности речных бассейнов взяты из глобальных баз данных, а затем наиболее важные из них уточнялись на основе оптимизации с использованием суточных значений измеренного стока в разных створах рассматриваемых рек (см. рис. 4) (для р. Лена за период, равный семи годам, для р. Обь — восьми годам). Результаты расчётов с использованием полученных оптимальных значений параметров проверялись по данным наблюдений за стоком за гораздо более длительные периоды. При создании базы данных растительного покрова, адаптированной под модель SWAP, за основу принята глобальная база данных из проекта Second Global Soil Wetness Project (GSWP-2) [23, 24]. При этом использовалась классификация типов подстилающей поверхности International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), включающая в себя 17 типов поверхности суши. База данных корректировалась для устранения грубых несоответствий и ошибок, а также была дополнена рядом специфических параметров, необходимых при работе с моделью SWAP. Подробности указанной корректировки изложены в работе [6]. Там же приведён и перечень параметров растительного покрова, используемых в модели SWAP.

При подготовке адаптированной под модель SWAP базы данных по почвенным параметрам за основу приняты данные из информационной базы International Satellite Land-Surface Climatology Project Initiative II (ISLSCP-II)/GSWP-2, которые, в свою очередь, взяты из IGBP-DIS (Data Information System). Указанные данные также частично корректировались в целях устранения неправдоподобных значений ряда параметров и согласования их между собой и с параметрами растительного покрова [6]. Последняя группа данных — топографические характеристики, включающие в себя среднюю высоту ячейки расчётной сетки и углы наклона поверхности ячейки в меридиональном и широтном направлениях, высоты, необходимые для расчётов трансформации стока в пределах расчётной ячейки, — взята из информационной базы Центра данных по системам наблюдений за ресурсами Земли

Earth Resources Observation Systems Data Center (EDC); углы наклона рассчитаны по данным о средних высотах соседних ячеек.

Отметим, что в рассмотренной ранее зависимости $\alpha_{sn}(\rho_{sn})$ использовались значения параметров, полученные на основе указанных выше данных наблюдений за динамикой снежного покрова на участке Валдайской водно-балансовой станции, поскольку рассмотренные речные бассейны в основном находятся в зоне российских таёжных лесов.

Рассмотрим результаты моделирования снежного покрова на территории бассейнов выбранных рек. На рис. 5, а приведена динамика измеренных и рассчитанных средних по бассейну р. Лена снегозапасов [14]. Данные об измеренных снегозаписах взяты из материалов маршрутных снегосъёмок на соответствующих снегомерных станциях, расположенных в бассейне (см. рис. 4, а). Статистические критерии соответствия указанных величин, а именно эффективность расчёта по Нэш—Саклифу *Eff* [25] и систематическая ошибка *Bias* равны соответственно 0,90 и 1,3% (0,8 мм).

Можно оценить также способность модели SWAP воспроизводить распределение снегозапасов по территории бассейна р. Лена. На рис. 5, в приведён пример такого распределения, рассчитанного на конец февраля и осреднённого за 1966–1999 гг. (при пространственной интерполяции распределения снегозапасов использован метод кригинга). Здесь же (см. рис. 5, б) для сравнения дано распределение, полученное по данным маршрутных снегосъёмок на снегомерных станциях. Поскольку снегомерных станций с удовлетворительным качеством данных наблюдений на весь речной бассейн с прилегающей территорией было всего около 40, что, к сожалению, для такой огромной площади недостаточно (особенно плохо обеспечены данными наблюдений северная и северо-западная части бассейна), получить точную картину пространственного распределения измеренных снегозапасов, даже при использовании такого мощного метода, как кригинг, невозможно (см. рис. 5, б). Поэтому есть основания полагать, что снегозапасы, рассчитанные по 395 модельным ячейкам, дают более реальную картину распределения снега по бассейну (см. рис. 5, в).

На рис. 6, а показана многолетняя динамика снегозапасов, осреднённых по всему Обь-Иртышскому бассейну. Средние по бассейну

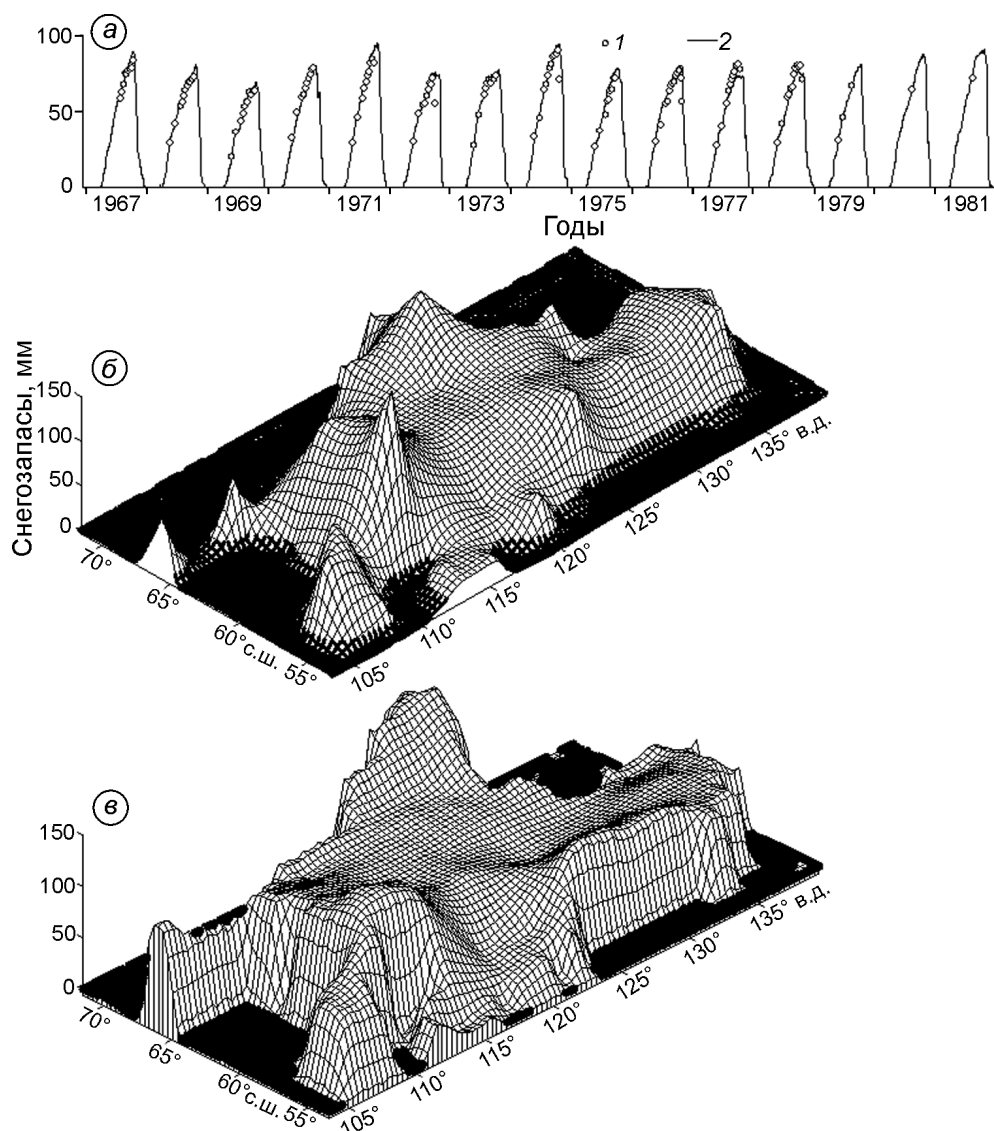


Рис. 5. Временная и пространственная вариации снегов запасов в бассейне р. Лена [14].

a – динамика осреднённых по бассейну р. Лена измеренных (1) и рассчитанных (2) снегов запасов; *б, в* – пространственное распределение по бассейну р. Лена осреднённых за 1966–1999 гг. измеренных (*б*) и рассчитанных (*в*) снегов запасов на конец февраля

Fig. 5. Temporal and spatial variations of snowpack within the Lena River basin [14].

a – the dynamics of measured (1) and modeled (2) snowpack averaged over the Lena River basin; *б, в* – the spatial distribution of measured (*б*) and calculated (*в*) snowpack at the end of February over the Lena River basin, averaged over the period of 1966–1999

снегов запасы определялись на основе данных измерений 128 маршрутных снегов съёмки на 115 снегомерных станциях, расположенных непосредственно в бассейне или рядом с ним (см. рис. 4). Поскольку не всегда в конкретные сутки присутствовали данные снегов съёмки по каждой станции, для повышения качества оценки средних по бассейну измеренных снегов запасов осреднения данных снегомерных наблюдений выполнялись только для тех суток, когда число маршрутов пре-

вышало 85. Средние по бассейну смоделированные снегов запасы находились путём осреднения их значений, рассчитанных для каждой ячейки по модели SWAP с учётом площадей ячеек. Среднеквадратическое отклонение измеренных и рассчитанных средних по бассейну снегов запасов оказалось равным около 10 мм, эффективность расчётов $Eff = 0,80$. Учитывая точечный характер процедуры измерения снегов запасов, а также редкую снегомерную сеть для Обь-Иртышского бас-

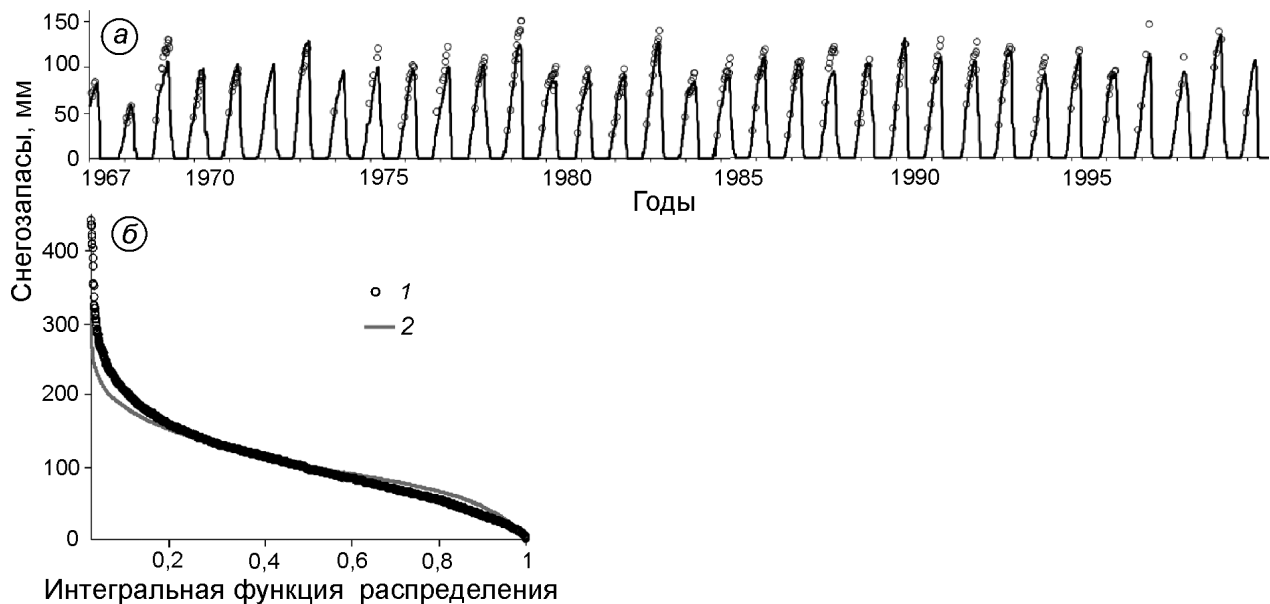


Рис. 6. Сопоставление характеристик снегозапасов в районе Обь-Иртышского бассейна, полученных по данным снегомерных измерений и рассчитанных на основе модели SWAP.

a – динамика осреднённых по Обь-Иртышскому бассейну измеренных (кружки) и рассчитанных (линия) снегозапасов; *b* – интегральная функция распределения по территории бассейна климатических (осреднённых за расчётный период) значений снегозапасов, полученных на основе снегомерных наблюдений (1) и модельных расчётов (2)

Fig. 6. Comparison of characteristics of snowpack within the Ob-Irtysh basin, obtained from snow measurements and simulated by the SWAP model.

a – the dynamics of measured (circles) and modeled (line) snowpack averaged over the Ob-Irtysh River basin; *b* – the cumulative probability function of climatic values (averaged over the calculational period) of measured (1) and simulated snowpack (2)

сейна (одна снегомерная станция приблизительно на 25 тыс. км²), соответствие измеренных и рассчитанных снегозапасов можно признать удовлетворительным. Подтверждает хорошее качество расчёта снежного покрова интегральная функция его распределения P (обеспеченность) по территории бассейна. На рис. 6, б приведён пример сопоставления интегральных функций распределения климатических значений снегозапасов (осреднённых по расчётному периоду) по бассейну на 31 марта, полученных на основе маршрутных снегомерных наблюдений, и данных о снегозаписах в расчётных ячейках Обь-Иртышского бассейна, рассчитанных по модели SWAP.

Заключение

В рамках проекта ESM-SnowMIP, в котором участвовало 26 моделей, имеющих блоки формирования снежного покрова, из 14 стран (включая и модель авторов настоящей статьи SWAP),

проведены расчёты формирования снегозапасов для десяти экспериментальных площадок, расположенных в разных районах земного шара и предназначенных для многолетнего наблюдения за динамикой снежного покрова. Районы расположения площадок существенно отличаются по природным условиям: климату (бореальный, морской, арктический, альпийский), типу почв, высоте над уровнем моря, поверхностному покрову (от практически оголённой почвы до хвойных и лиственных лесов). Полученные результаты по качеству воспроизведения динамики снегозапасов на всех рассмотренных площадках показали, что модель SWAP находится в числе лучших мировых моделей формирования снежного покрова. Таким образом, можно считать, что модель SWAP характеризуется более или менее оптимальной степенью сложности алгоритма воспроизведения динамики снежного покрова, необходимой и достаточной в глобальных и региональных гидрологических моделях, описывающих формирование составляющих водного баланса суши в холодных

регионах планеты, и её можно использовать для получения сценарных прогнозов изменения динамики снеготазов (как важной части криосферы) для участков суши, находящихся в различных природных условиях.

Этот вывод подтвердили вполне адекватные результаты воспроизведения моделью SWAP многолетней динамики осреднённых по площади снеготазов и их распределения по территории бассейнов двух крупнейших рек Российской Федерации – Лены и Оби (с её притоком Иртышом).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФ (грант № 16-17-10039); расчёты динамики снеготазов на территории бассейна р. Лена – при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 14.B25.31.0026).

Авторы выражают признательность организаторам проекта ESM-SnowMIP за обеспечение необходимой для модельных расчётов информации и персонально R. Essery за предоставленные результаты расчётов по всем участвующим в проекте ESM-Snow моделям.

Acknowledgments. The work was supported by the Russian Science Foundation: project № 16-17-10039; calculations of snowpack dynamics in the Lena river basin were supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation (project № 14.B25.31.0026). The authors are grateful to organizers of the ESM-SnowMIP project for providing data needed for model simulations and personally to R. Essery for the results of simulations from all participating in ESM-Snow models.

Литература

1. *Derksen C., Brown R.* Spring snow cover extent reductions in the 2008–2012 period exceeding climate model projections // *Geophys. Research Letters*. 2012. V. 39. P. 1–6. doi: 10.1029/2012GL053387.
2. *Brown R.D., Mote P.W.* The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate // *Journ. of Climate*. 2009. V. 22. P. 2124–2145. doi: 10.1175/2008JCLI2665.1.
3. *Déry S.J., Brown R.D.* Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snow-albedo feedback // *Geophys. Research Letters*. 2007. V. 34. P. 2–7. doi: 10.1029/2007GL031474.
4. *Räisänen J.* Warmer climate: Less or more snow? // *Climate Dynamics*. 2008. V. 30. P. 307–319. doi: 10.1007/s00382-007-0289-y.
5. *Krinner G., Derksen C., Essery R., Flanner M., Hagemann S., Clark M., Hall A., Rott H., Brutel-Vuilmet C., Kim H., Ménard C.B., Mudryk L., Thackeray C., Wang L., Arduini G., Balsamo G., Bartlett P., Boike J., Boone A., Chéruf F., Colin J., Cuntz M., Dai Y., Decharme B., Derry J., Ducharne A., Dutra E., Fang X., Fierz C., Ghattas J., Gusev Y., Haverd V., Kontu A., Lafaysse M., Law R., Lawrence D., Li W., Marke T., Marks D., Nasonova O., Nitta T., Niwano M., Pomeroy J., Raleigh M.S., Schaedler G., Semenov V., Smirnova T., Stacke T., Strasser U., Svenson S., Turkov D., Wang T., Wever N., Yuan H., Zhou W.* ESM-SnowMIP: Assessing models and quantifying snow-related climate feedbacks // *Geoscientific Model Development*. 2018. V. 11. P. 5027–5049. doi: 10.5194/gmd-2018-153.
6. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.

References

1. *Derksen C., Brown R.* Spring snow cover extent reductions in the 2008–2012 period exceeding climate model projections. *Geophys. Research Letters*. 2012, 39: 1–6. doi: 10.1029/2012GL053387.
2. *Brown R.D., Mote P.W.* The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate. *Journ. of Climate*. 2009, 22: 2124–2145. doi: 10.1175/2008JCLI2665.1.
3. *Déry S.J., Brown R.D.* Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snow-albedo feedback. *Geophys. Research Letters*. 2007, 34: 2–7. doi: 10.1029/2007GL031474.
4. *Räisänen J.* Warmer climate: Less or more snow? *Climate Dynamics*. 2008, 30: 307–319. doi: 10.1007/s00382-007-0289-y.
5. *Krinner G., Derksen C., Essery R., Flanner M., Hagemann S., Clark M., Hall A., Rott H., Brutel-Vuilmet C., Kim H., Ménard C.B., Mudryk L., Thackeray C., Wang L., Arduini G., Balsamo G., Bartlett P., Boike J., Boone A., Chéruf F., Colin J., Cuntz M., Dai Y., Decharme B., Derry J., Ducharne A., Dutra E., Fang X., Fierz C., Ghattas J., Gusev Y., Haverd V., Kontu A., Lafaysse M., Law R., Lawrence D., Li W., Marke T., Marks D., Nasonova O., Nitta T., Niwano M., Pomeroy J., Raleigh M.S., Schaedler G., Semenov V., Smirnova T., Stacke T., Strasser U., Svenson S., Turkov D., Wang T., Wever N., Yuan H., Zhou W.* ESM-SnowMIP: Assessing models and quantifying snow-related climate feedbacks. *Geoscientific Model Development*. 2018, 11: 5027–5049. doi: 10.5194/gmd-2018-153.
6. *Gusev E.M., Nasonova O.N.* *Modelirovanie teplo- i vlagobmena poverkhnosti sushi s atmosferoy*. Modelling heat and water exchange of land surface with atmosphere. Moscow: Nauka, 2010: 328 p. [In Russian].

7. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The simulation of heat and water exchange at the land–atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP // *Hydrological Processes*. 2002. V. 16. P. 1893–1919. doi: 10.1002/hyp.362.
8. Gusev E.M., Nasonova O.N. Parametrization of heat and moisture transfer processes in ecosystems of boreal forests // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2001. V. 37. № 2. P. 167–185.
9. Козин В.В., Кузнецова Э.А. Физико-географические факторы пространственно-временной изменчивости снежного покрова нефтегазопромыслового региона. Нижневартовск: изд. Нижневартовского гос. ун-та, 2015. 151 с.
10. Мачульская Е.Е. Моделирование и диагноз процессов тепловлагообмена между атмосферой и сушией в условиях холодного климата: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук: 25.00.30. М.: Гидрометцентр, 2001. 22 с.
11. Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // *Криосфера Земли*. 2009. Т. 13. № 4. С. 69–79.
12. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование процессов тепловлагообмена суши с атмосферой в локальном масштабе для территорий с многолетней мерзлотой // *Почвоведение*. 2004. № 9. С. 1077–1092.
13. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. Моделирование формирования стока рек и снежного покрова на севере Западной Сибири // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42. № 4. С. 387–395. doi: 10.7868/S0321059615040069.
14. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Физико-математическое моделирование многолетней динамики суточных значений речного стока и снегозапасов в бассейне р. Лены // *Водные ресурсы*. 2016. Т. 43. № 1. С. 24–36. doi: 10.7868/S0321059616010089.
15. 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 // *Atmosphere–Ocean*. 2006. V. 44. № 3. P. 207–222. doi: 10.3137/ao.440301.
16. Morin S., Lejeune Y., Lesaffre B., Panel J.-M., Poncet D., David P., Sudul M. An 18-yr long (1993–2011) snow and meteorological dataset from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m alt.) for driving and evaluating snowpack models // *Earth Syst. Sci. Data*. 2012. V. 4. P. 13–21. doi: 10.5194/essd-4-13-2012.
17. Reba M.L., Marks D., Seyfried M., Winstral A., Kumar M., Flerchinger G. A long-term data set for hydrologic modeling in a snow-dominated mountain catchment // *Water Resources Research*. 2011. V. 47. P. 1–7. doi: 10.1029/2010WR010030.
18. Niwano M., Aoki T., Kuchiki K., Hosaka M., Kodama Y. Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP)
7. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The simulation of heat and water exchange at the land–atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP. *Hydrological Processes*. 2002, 16: 1893–1919. doi: 10.1002/hyp.362.
8. Gusev E.M., Nasonova O.N. Parametrization of heat and moisture transfer processes in ecosystems of boreal forests. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2001, 37 (2): 167–185.
9. Kozin V.V., Kuznetsova E.A. *Fisiko-geograficheskie faktory prostranstvenno-vremennoy izmenchivosti snezhnogo pokrova neftegazopromyslovogo regiona*. Physical and geographical factors of spatial and temporal variability of snow cover of oil and gas field region. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University. 2015: 151 p. [In Russian].
10. Machul'skaya E.E. *Modelirovanie i diagnoz processov teplovлагообмена mezhdu atmosferoy i sushey v usloviyakh kholodnogo klimata*. Modeling and diagnosis of heat and water exchange between the atmosphere and land surface in a cold climate. PhD. Thesis. Moscow: Gidrometcentr, 2001: 22 p. [In Russian].
11. Shmakin A.B., Turkov D.V., Mikhailov A.Yu. Model of snow cover with inclusion of layered structure and its seasonal evolution. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2009, 13 (4): 69–79. [In Russian].
12. Gusev E.M., Nasonova O.N. Simulation of heat and water exchange at the land–atmosphere interface on a local scale for permafrost territories. *Eurasian Soil Science*. 2004, 37 (9): 946–959.
13. Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Y., Ayzel G.V. Simulating the formation of river runoff and snow cover in the northern west Siberia. *Water Resources*. 2015, 42 (4): 460–467. doi: 10.1134/S0097807815040065.
14. Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ya. Physically based modeling of many-year dynamics of daily streamflow and snow water equivalent in the Lena R. basin. *Water Resources*. 2016, 43 (1): 21–32. doi: 10.1134/S0097807816010085.
15. 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. *Atmosphere–Ocean*. 2006, 44 (3): 207–222. doi: 10.3137/ao.440301.
16. Morin S., Lejeune Y., Lesaffre B., Panel J.-M., Poncet D., David P., Sudul M. An 18-yr long (1993–2011) snow and meteorological dataset from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m alt.) for driving and evaluating snowpack models. *Earth Syst. Sci. Data*. 2012, 4: 13–21. doi: 10.5194/essd-4-13-2012.
17. Reba M.L., Marks D., Seyfried M., Winstral A., Kumar M., Flerchinger G. A long-term data set for hydrologic modeling in a snow-dominated mountain catchment. *Water Resources Research*. 2011, 47: 1–7. doi: 10.1029/2010WR010030.
18. Niwano M., Aoki T., Kuchiki K., Hosaka M., Kodama Y. Snow metamorphism and albedo process (SMAP)

- model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan // *Geophys. Research Letters. Earth Surface*. 2012. V. 117. P. 1–18. doi: 10.1029/2011JF002239.
19. Landry C.C., Buck K.A., Raleigh M.S., Clark M.P. Mountain system monitoring at Senator Beck Basin, San Juan Mountains, Colorado: A new integrative data source to develop and evaluate models of snow and hydrologic processes // *Water Resources Research*. 2014. V. 50. P. 1773–1788. doi: 10.1002/2013WR013711.
 20. Essery R., Kontu A., Lemmetyinen J., Dumont M., Ménard C.B. A 7-year dataset for driving and evaluating snow models at an Arctic site (Sodankylä, Finland) // *Geoscience Instrumentation, Methods Data System*. 2016. V. 5. P. 219–227. doi: 10.5194/gi-5-219-2016.
 21. <http://www.envidat.ch/dataset/snowmip>. doi: 10.16904/16. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. Weissfluhjoch dataset for ESM-SnowMIP. 2017.
 22. https://www.geos.ed.ac.uk/~ressery/ESM-SnowMIP/ESMSnowMIP_Reference_sites.pdf.
 23. Dirmeyer P., Gao X., Oki T. The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan // IGPO Publ. Series. Silver Spring: Int. GEWEX Project Office. 2002. № 37. 75 p.
 24. Zhao M., Dirmeyer P. Production and analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets // COLA Technical Report. Calverton: Center for Ocean–Land–Atmosphere Studies, 2003. № 159. 38 p.
 25. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // *Journ. of Hydrology*. 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.
19. Landry C.C., Buck K.A., Raleigh M.S., Clark M.P. Mountain system monitoring at Senator Beck Basin, San Juan Mountains, Colorado: A new integrative data source to develop and evaluate models of snow and hydrologic processes. *Water Resources Research*. 2014, 50: 1773–1788. doi: 10.1002/2013WR013711.
 20. Essery R., Kontu A., Lemmetyinen J., Dumont M., Ménard C. B. A 7-year dataset for driving and evaluating snow models at an Arctic site (Sodankylä, Finland). *Geosci. Instrumentation. Methods Data Syst*. 2016, 5: 219–227. doi: 10.5194/gi-5-219-2016.
 21. <http://www.envidat.ch/dataset/snowmip>. doi: 10.16904/16. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. Weissfluhjoch dataset for ESM-SnowMIP. 2017.
 22. https://www.geos.ed.ac.uk/~ressery/ESM-SnowMIP/ESMSnowMIP_Reference_sites.pdf.
 23. Dirmeyer P., Gao X., Oki T. The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan. IGPO Publ. Series. Silver Spring: Int. GEWEX Project Office. 2002, 37: 75 p.
 24. Zhao M., Dirmeyer P. Production and Analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets. COLA Technical Report. Calverton: Center for Ocean–Land–Atmosphere Studies, 2003, 159: 38 p.
 25. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles. *Journ. of Hydrology*. 1970, 10 (3): 282–290.