

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 556.048

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОКА РЕК ОЛЕНЕК И ИНДИГИРКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТИ СУШИ С АТМОСФЕРОЙ SWAP<sup>1</sup>

© 2013 г. Е. М. Гусев, О. Н. Насонова, Л. Я. Джоган, Г. В. Айзель

*Институт водных проблем РАН*

*119333 Москва, ул. Губкина, 3*

*E-mail: sowaso@yandex.ru*

Поступила в редакцию 06.03.2012 г.

Исследованы возможности методики расчета стока с бассейнов рек Республики Саха (Якутия) – Оленек и Индигирка, находящихся в самых суровых климатических условиях суши. В основу методики расчета положена модель тепло- и влагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP в сочетании с информационным обеспечением, основанным на глобальных базах данных по параметрам подстилающей поверхности, а также метеорологической информации, полученной по данным наблюдений метеорологических станций, расположенных в бассейнах указанных рек или в непосредственной близости к ним. Для повышения качества расчетов использовался метод оптимизации части наиболее важных модельных параметров, включающих в себя как параметры подстилающей поверхности, так и (для р. Оленек) корректирующие множители для осадков и входящей радиации.

*Ключевые слова:* гидрограф речного стока, взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью суши, физико-математическое моделирование, глобальные базы данных, бассейны рек Оленек и Индигирка, оптимизация параметров

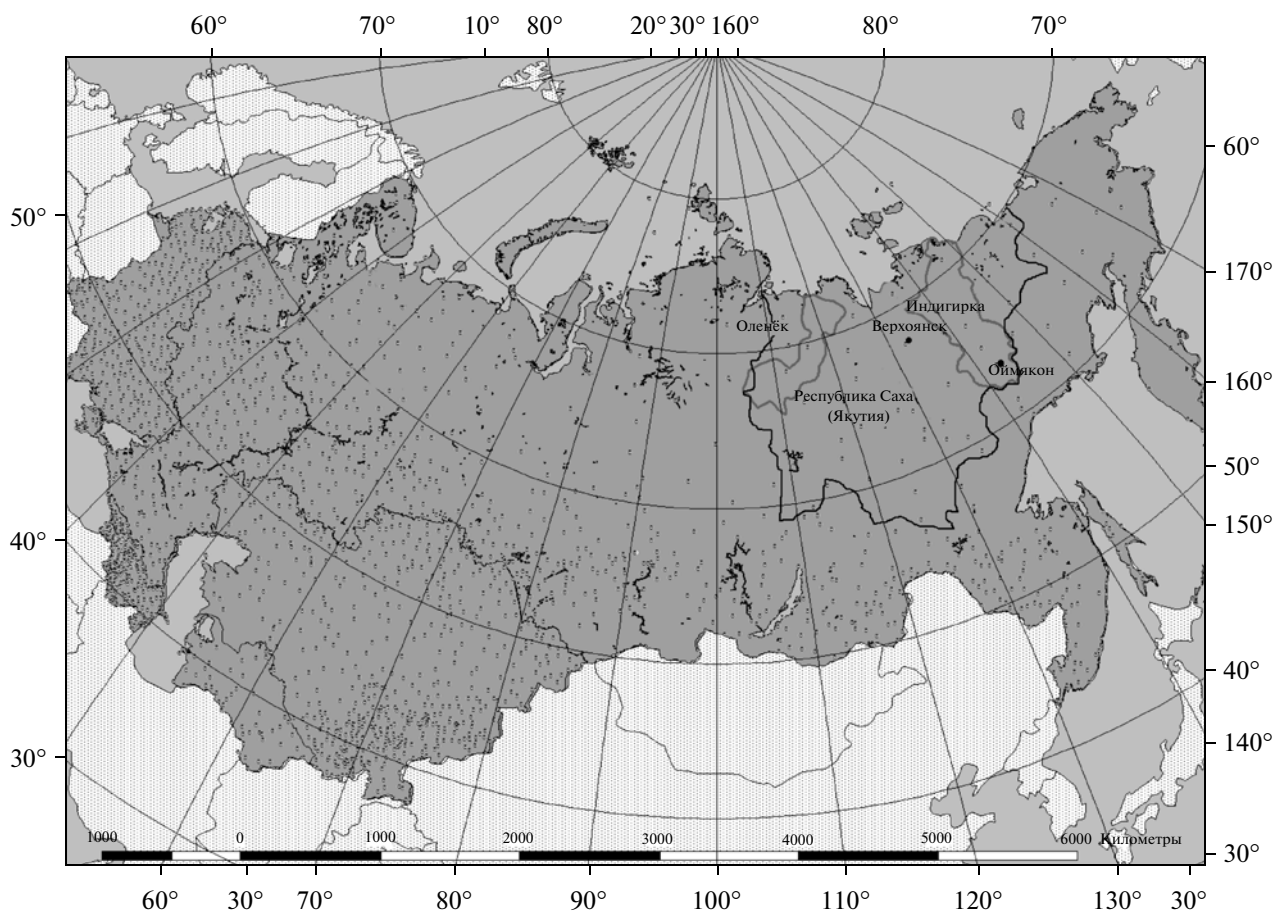
DOI: 10.7868/S032105961303005X

Глобальные климатические изменения, вызванные увеличением атмосферной концентрации двуокси углерода и других парниковых газов, начали проявляться и, вероятно, будут усиливаться в течение последующих десятилетий. Во всяком случае в геофизическом сообществе растет количество ученых, придерживающихся мнения, что Земля будет испытывать постепенное потепление в ближайшие десятилетия, основная причина которого – продолжающийся рост концентрации парниковых газов в атмосфере. По оценкам многих авторов (например, [21]), концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере к 2100 г. может почти удвоиться по сравнению с уровнем 1990 г., если выбросы двуокси углерода в атмосферу сохранятся. Поэтому в последние годы направление исследований, связанных с изменением климата, переместилось с поиска ответа на вопрос: есть ли глобальное потепление – на выяснение того, где и какой значимости могут произойти изменения на Земле вследствие глобального потепления. Как отмечается в [11], полярные регионы, в зна-

чительной мере контролируемые гидрологические процессы и водные ресурсы Земли, подвергнутся ряду самых ранних и наиболее глубоких изменений, вызванных изменением климата. Большая озабоченность по поводу влияния меняющегося климата на водные ресурсы полярных регионов высказывается в отношении Арктики. Пан-Арктический бассейн характеризуется огромным разнообразием водных ресурсов, включая многие самые большие реки мира. При этом в докладах МГЭИК [13–15] даются оценки приращения температуры в северном полушарии к концу XXI в. – 3–5°C, а приращения осадков – на целых 15%.

Существенная часть водных ресурсов Арктики формируется в бассейнах крупных рек, впадающих в Северный Ледовитый океан. Поскольку эти реки переносят тепло, осадки, биогенные и загрязняющие вещества на север, то изменения климата даже в низких широтах оказывают значительное влияние на Арктику. Кроме того, изменения в совокупном стоке всех арктических бассейнов могут иметь большое значение для пресноводного баланса Северного Ледовитого океана, образования морских льдов и в конечном счете –

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-00015) и РАН (Госконтракт 74ОК/11-5).



**Рис. 1.** Расположение бассейнов рек Оленек и Индигирка (границы показаны темно-серым цветом) и метеорологических станций (мелкие кружки) на территории бывшего СССР.

для потенциального воздействия на термохалинную циркуляцию и глобальный климат [11]. В частности, это касается и Гольфстрима, охлажденный поток которого, возвращаясь в южные широты, замыкает здесь конвейер своего течения. На работу конвейера оказывает сильное влияние соленость океанской воды, которая может заметно меняться как из-за таяния льдов Гренландии, так и из-за увеличения потока пресной воды, выносимой сибирскими реками.

В связи со сказанным возрастает роль и актуальность разработки моделей тепловлагообмена поверхности суши с атмосферой (в англоязычной литературе для подобных моделей используется аббревиатура LSM – Land Surface Model), которые могут быть использованы в качестве инструментария для оценки и прогноза стока сибирских рек, а также динамики водных ресурсов северного региона Земли при наличии набора сценариев климатических прогнозов. В ряде статей авторов настоящей работы [7–9, 19, 20] уже были показаны возможности LSM SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants)

для расчетов составляющих водного баланса бассейнов северных рек, расположенных в Европейской части Российской Федерации.

Данная работа посвящена исследованию применения модели SWAP для оценки составляющих водного баланса в другой части пан-Арктического бассейна, наиболее суровой в отношении климатических условий, – в среднесибирском регионе России, в бассейнах рек: Оленек, протекающей на северо-западе Республики Саха (Якутии), и Индигирка, протекающей в ее северо-восточной части (рис. 1). Причины, по которым были выбраны бассейны указанных рек, связаны именно со спецификой климата данного региона, определяющей суровость его метеорологических условий и особенности подстилающей поверхности. В частности, именно в Якутии находится “полюс холода” северного полушария (официально – в районе г. Верхоянска, неофициально – у с. Оймякон (рис. 1)).

Указанный регион практически весь расположен в зоне вечной мерзлоты, что определяет спе-

цифику подстилающей поверхности данной территории, влияющую на ее тепло- и влагообмен с атмосферой. Поэтому задачами данного исследования были ответы на следующие вопросы: во-первых, насколько хорошо модель SWAP воспроизводит речной сток в этих экстремальных природных условиях; во-вторых, насколько редкость расположения метеостанций в этом регионе (рис. 1), обеспечивающих основную входную информацию модели с точки зрения “раскручивания” гидрологических процессов в районах выбранных бассейнов, и не очень хорошее качество самих метеорологических данных и информации о речном стоке (все указанные факторы также обусловлены суровостью природных условий, существенно затрудняющих получение информационного обеспечения) скажутся на модельном воспроизведении стока указанных рек.

#### ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СТОКА РЕК ИНДИГИРКА И ОЛЕНЕК

Методика расчета гидрографов стока рек Индигирка и Оленек основана на использовании модели LSM SWAP, представленной в [2–6, 18]. В ее основу положено физико-математическое описание процессов тепло- и влагообмена, происходящих в системе грунтовые воды–почва–растительный/снежный покров–приземный слой атмосферы. Модель позволяет рассчитывать составляющие водного и теплового балансов наземных экосистем и речных бассейнов, имеющих разные пространственные масштабы и находящихся в различных природных условиях, включая наличие многолетней мерзлоты.

#### ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

Бассейн р. Оленек расположен на северо-западе Якутии за полярным кругом (между 104° в.д. и 124° в.д.) (рис. 1). Река берет начало на склонах горы Янгкан, впадает в Оленекский зал. моря Лаптевых. Река порожистая, ее длина достигает 2292 км, площадь бассейна  $\approx 220$  тыс. км<sup>2</sup>. Среднегодовой слой стока составляет 174 мм. Бассейн реки беден озерами, общая озерность не более 0.67%, заболоченность достигает 6.3%.

Климат рассматриваемой территории – резко континентальный, что проявляется в очень низких зимних температурах воздуха (минимальные температуры достигают  $-60...-55^{\circ}\text{C}$ ) и высоких летних (максимальные доходят до  $20...30^{\circ}\text{C}$ ). Главные факторы, определяющие такое своеобразие кли-

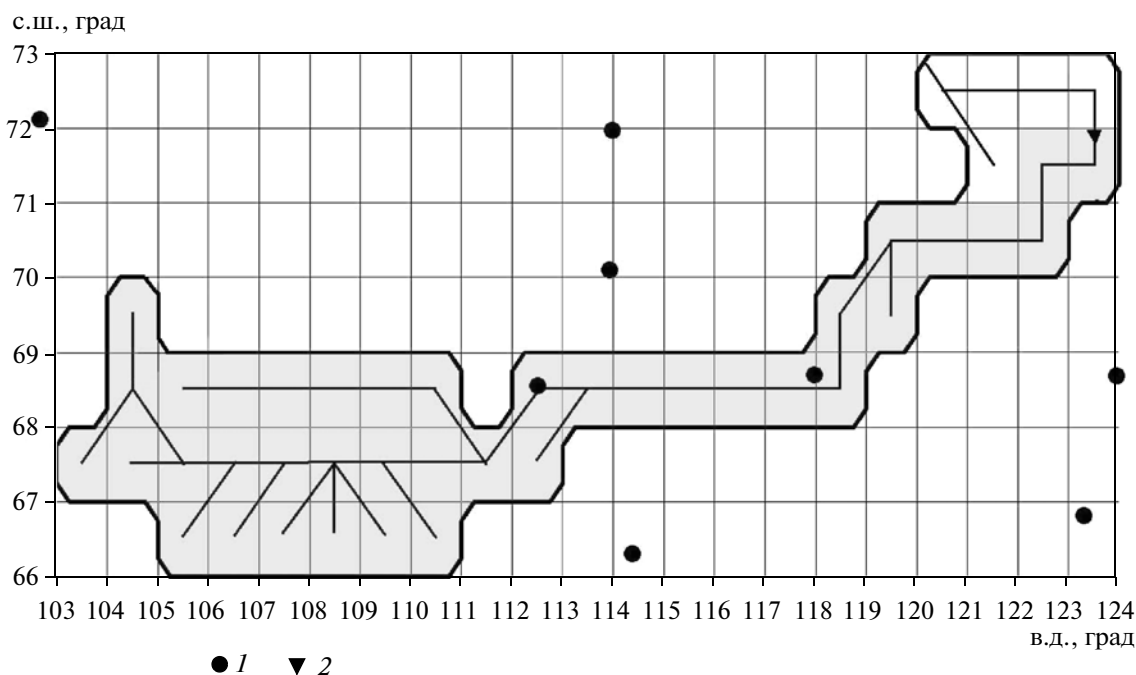
мата, – характер общей циркуляции воздушных масс и физико-географические особенности территории: ее удаленность и отгороженность горными системами от Атлантического и Тихого океанов, а также открытость со стороны Северного Ледовитого океана. Малоснежная зима и исключительно низкие температуры воздуха способствуют широкому распространению многолетней мерзлоты, достигающей большой мощности – до 500 м. Мощность сезонноталого слоя в среднем изменяется от 0.5 до 5.0 м. Лето короткое, но теплое. Летом в результате развития циклонической деятельности выпадает наибольшее количество осадков (около 300 мм), зимой осадков выпадает  $\sim 35-45$  мм.

На территории бассейна снежный покров залегает около 230 дней на юге и 250 дней на севере. Суммарное испарение составляет 150 мм на севере и 200 мм на юге. Почвы в основном глеевые мерзлотно-таежные, на побережье – торфянисто-болотные и глеевые торфянисто-болотные. Растительность представлена мохово-лишайниково-кустарничковой тундрой (на севере) и лиственничными северо-таежными редкостойными лесами (преимущественно с лиственницей даурской) в средней и южной частях бассейна.

Питание р. Оленек преимущественно снеговое. Для водного режима характерно хорошо выраженное весеннее половодье (с конца мая – начала июня до примерно середины июля), на период которого приходится 80–90% объема годового стока. Ледостав начинается в конце сентября – начале октября. Лед вскрывается в конце мая – начале июня.

Бассейн р. Индигирки (рис. 1) расположен в восточной части Лено-Индигирского региона между 62° с.ш. и 72° с.ш. и 136° в.д. и 151° в.д. Индигирка – одна из самых больших рек, впадающих в Восточно-Сибирское море, ее длина – 1726 км. Бассейн реки находится в пределах четырех географических зон: таежных лесов (занимающих почти 80% площади бассейна), тундры, лесотундры и арктической пустыни. Площадь бассейна – 360 тыс. км<sup>2</sup>, средний годовой слой стока – 158 мм. По строению долины и русла р. Индигирка делится на два участка: верхний горный (протяженностью 640 км) и нижний равнинный (1086 км).

Характерной особенностью всей территории бассейна р. Индигирки (так же как и бассейна р. Оленек) является суровый и резко континентальный климат (полярный и субполярный), повсеместное распространение многолетней мерзлоты большой мощности, наличие наледей (особенно в горах). Зима характеризуется очень



**Рис. 2.** Схематизация бассейна р. Оленек. 1 — метеорологические станции (здесь и на рис. 3 кружки за пределами графика — станции, расположенные за границами изучаемого района), 2 — стоковая станция в 7.5 км от устья р. Бур (Пур).

низкими температурами воздуха (минимальные —  $-65...-50^{\circ}\text{C}$ ), а лето — высокими (максимальные — до  $20-35^{\circ}\text{C}$ ). Зима малоснежная и сухая с незначительным снежным покровом. Факторы, определяющие указанную специфику климата, практически те же, что и для бассейна р. Оленек.

Годовое количество осадков по территории изменяется от 250 мм на побережье до 600 мм в горах. На равнинной части территории бассейна осадки составляют 250–350 мм. Осадки выпадают в основном в теплый период года. Сумма осадков в холодный период составляет 35–45 мм.

На большей части территории снежный покров залегает в течение 7–8 мес. На побережье и в высокогорных районах (на высотах до 2000 м) он держится 260–280 дней. На всей территории бассейна снежный покров устанавливается в начале третьей декады сентября. Разрушение устойчивого снежного покрова начинается в истоках Индигирки в конце мая, на севере территории — в начале июня.

В долине Индигирки и на затопляемых террасах развиты молодые слоистые аллювиальные супесчано-галечниковые почвы, на незатопляемых террасах — лугово-болотные и торфянисто-болотные почвы.

Характерная черта растительного покрова территории — почти повсеместное преобладание в лесной зоне лиственных лесов из даурской

лиственницы. На севере выделяется зона арктических (каменистых) пустынь и зона мохово-лишайниковой тундры и лесотундры. В питании р. Индигирки участвуют дождевые и талые (снеговые, ледниковые и наледные) воды.

#### СХЕМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ БАССЕЙНОВ

Для проведения модельных расчетов стока выбранных рек была использована схематизация их бассейнов в виде совокупности ячеек пространственной сетки с разрешением  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  (рис. 2 и 3), соединенных гидрографической сетью. Для каждой ячейки определялась ее площадь, влияющая на общее стокообразование в ячейке. Модель SWAP рассчитывает характеристики водного и теплового режимов для каждой ячейки, а затем на основе блоков трансформации стока внутри ячейки и в речной сети моделирует гидрограф стока для любого речного створа [5, 8]. Результаты расчетов стока рек Мезени, Печоры и Северной Двины [7–9], а также исследования, проведенные (при участии авторов статьи) в международном проекте Rhone-Aggregation [12], дали основание полагать, что использование расчетной сетки с одноградусным пространственным разрешением не приводит к значительным погрешностям результатов моделирования речного стока с суточным или месяч-

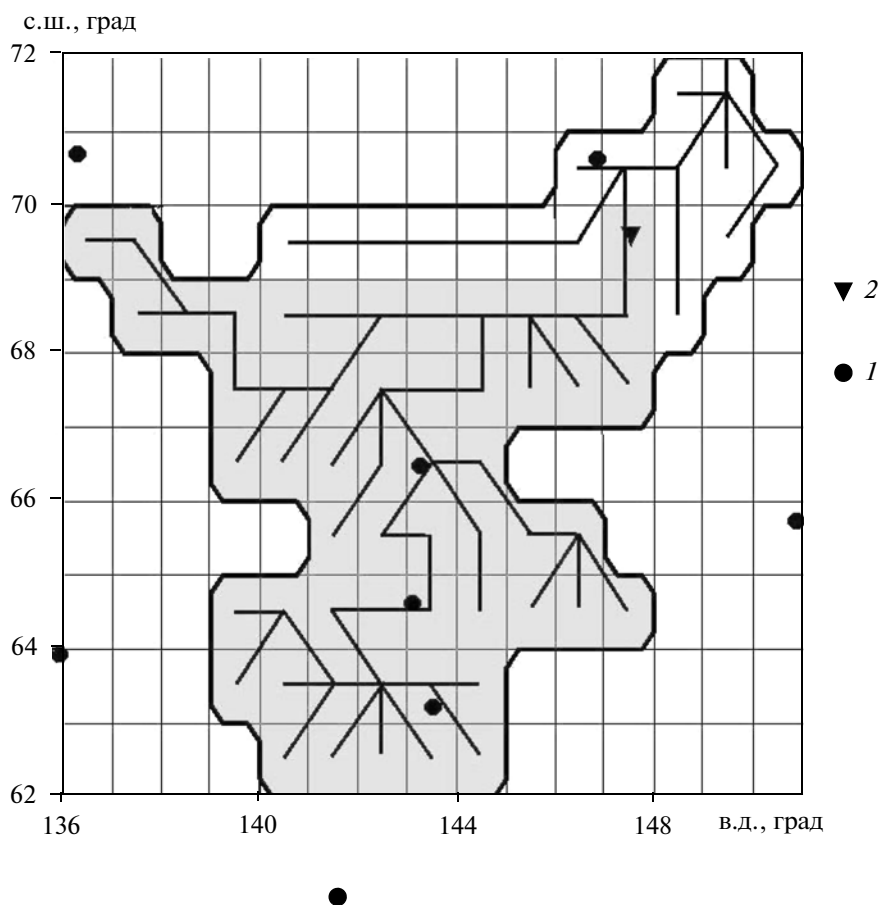


Рис. 3. Схематизация бассейна р. Индигирки. 1 – метеорологические станции, 2 – стокосая ст. Воронцово.

ным шагом с рассматриваемых в настоящей работе бассейнов.

Из рис. 2 и 3 следует, что бассейн р. Оленек (до стокосой станции, расположенной в 7.5 км от устья р. Бур (Пур)) представлен совокупностью 39 ячеек, бассейн р. Индигирки (до створа Воронцово) – 55 ячеек. Разное количество ячеек обусловлено различием величин указанных выше площадей бассейнов исследуемых рек. На приведенных схемах видно, что плотность сети метеорологических станций в районе выбранных бассейнов (даже с включением станций, расположенных в окрестности бассейнов) крайне низка: ~5–6 станций на 1 млн км<sup>2</sup>.

#### ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ СТОКА ВЫБРАННЫХ РЕК

Необходимое при проведении расчетов информационное обеспечение LSM-модели SWAP включало в себя приземную метеорологическую информацию (температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, атмосфер-

ные осадки, а также значения приходящих потоков коротковолновой и длинноволновой радиации) с трехчасовым временным разрешением и параметры подстилающей поверхности (почвы, растительного покрова, топографии бассейна). Метеорологические характеристики были получены из данных наблюдений метеорологических станций (рис. 2, 3), значения приходящих потоков коротковолновой и длинноволновой радиации рассчитывались по данным стандартных метеорологических измерений по методике, приведенной в [5, 25]. Интерполяция значений метеорологических характеристик в центры расчетных ячеек осуществлялась на основе немного модифицированной процедуры кригинга [5, 8].

Параметры растительного покрова, почвы и топографии бассейнов, так же как и в [7–9, 19], были взяты из глобальных баз данных. При создании базы данных растительного покрова, адаптированной под модель SWAP, за основу была принята глобальная база данных из проекта Second Global Soil Wetness Project (GSWP-2) [10, 16, 27]. При этом использовалась классификация типов

подстилающей поверхности International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), включающая в себя 17 типов поверхности суши. База данных была скорректирована для устранения грубых несоответствий и ошибок, а также дополнена рядом специфических параметров, необходимых при работе с моделью SWAP [10]. В [10] содержится и перечень параметров растительного покрова, используемых в модели SWAP.

При подготовке адаптированной под модель SWAP базы данных по почвенным параметрам за основу были приняты данные из информационной базы International Satellite Land-Surface Climatology Project Initiative II (ISLSCP-II)/GSWP-2, которые взяты из Data Information System (IGBP-DIS). Указанные данные также были частично скорректированы в целях устранения неправдоподобных значений ряда параметров и согласования их между собой и с параметрами растительного покрова [10].

Последняя группа данных — топографические характеристики, необходимые для расчетов трансформации стока в пределах расчетных ячеек, — включала в себя средние высоты ячеек расчетной сетки и углы наклона поверхности ячеек в меридиональном и широтном направлениях. Высоты были взяты из информационной базы Центра данных по системам наблюдений за ресурсами Земли Earth Resources Observation Systems Data Center (EDC), углы наклона были рассчитаны по средним высотам соседних ячеек.

При этом необходимо учитывать следующее обстоятельство [5, 19]. Подготовка всей указанной выше информации представляет собой большую и трудоемкую работу, нередко осложняемую низким качеством или отсутствием соответствующих данных измерений, различиями в методиках их получения, а также необходимостью перехода от точечных измерений к данным, репрезентативным для обширных территорий. Полученное в результате информационное обеспечение, как правило, бывает разнородно по точности, надежности и достоверности в отношении различных групп данных. Поэтому для повышения качества результатов расчетов стока необходима оптимизация ряда модельных параметров, в наибольшей степени влияющих на формирование стока.

### ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ МОДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Набор характерных для водосборов северных рек параметров, подлежащих оптимизации, был определен и использован в [7–9]. Отметим, что последние могут включать в себя, наряду с харак-

теристиками подстилающей поверхности, корректирующие множители для осадков и входящей радиации. Корректирующие множители для осадков могут использоваться в расчетах в случаях ненадежности информации, что может быть связано с редкой сетью осадкомеров, значительными пропусками в рядах наблюдений, а также неточностью измерения осадков, особенно зимних [7]. Введение корректирующих множителей к значениям входящей радиации связано с тем, что значения радиации, как правило, рассчитываются и, следовательно, неизбежно содержат ошибки расчета.

Для северных рек число оптимизируемых в [7–9] параметров не превышало 11 (7–8 параметров подстилающей поверхности бассейна и 4 корректирующих множителя к метеорологическим элементам: жидким и твердым осадкам, коротковолновой и длинноволновой радиации). К оптимизируемым параметрам подстилающей поверхности для каждой ячейки относились, в частности, корректирующие множители (общие для всего бассейна) к значениям коэффициента фильтрации почвы  $K_0$ , толщине корнеобитаемого слоя  $h_r$  и альбедо подстилающей поверхности в теплый (бесснежный) и холодный (подстилающая поверхность суши покрыта снегом) периоды года:  $k_{K0}$ ,  $k_{hr}$  и  $k_{albsum}$ ,  $k_{albwin}$  соответственно. Кроме того, принималось, что для каждой ячейки расстояние от поверхности почвы до глубины практически водонепроницаемого слоя  $h_0 = k_{h0} h_r$ , где  $k_{h0}$  — множитель, общий для всего бассейна, который также калибровался. Наконец, калибровались такие параметры, как альбедо свежеснежного снега  $alb_{sn}$ , коэффициент шероховатости  $n$  в формуле Маннинга и эффективная скорость движения воды в русле  $u_e$ . В настоящем исследовании для р. Индигирки калибровалось только 8 параметров подстилающей поверхности, что же касается р. Оленек, то для повышения качества расчетов пришлось использовать 11 оптимизируемых параметров (из-за включения поправочных множителей к метеорологическим характеристикам).

Калибровка модельных параметров для выбранных бассейнов проводилась с использованием метода глобального поиска экстремума SCE-UA [17] по значениям суточного речного стока, измеренного на соответствующих для каждой реки стокowych станциях за 5-летний период (для обеих рек за 1986–1990 гг.). При этом ставилась задача не только достижения максимума целевой функции, в качестве которой использовалась эффективность расчета суточного стока по Нэшу и Сатклиффу [23]  $Eff$ , определяемая выражением

**Таблица 1.** Статистические характеристики соответствия рассчитанных и измеренных суточных значений стока рек Оленек и Индигирка

Река	Стоковая станция	Годы	<i>Eff</i>	<i>Bias</i> , %	<i>Corr</i>
Калибровочный период (8 калибровочных параметров)					
Индигирка	Воронцово	1986–1990	0.78	–5.0	0.89
Оленек	7.5 км от устья р. Бур (Пур)	1986–1990	0.68	–4.5	0.83
Калибровочный период (11 калибровочных параметров)					
Оленек	7.5 км от устья р. Бур (Пур)	1986–1990	0.73	1.6	0.86
Многолетний расчетный период (8 калибровочных параметров)					
Индигирка	Воронцово	1967–1992	0.77	1.1	0.88
Оленек	7.5 км от устья р. Бур (Пур)	1967–1990	0.62	7.5	0.79
Многолетний расчетный период (11 калибровочных параметров)					
Оленек	7.5 км от устья р. Бур (Пур)	1967–1990	0.67	12.8	0.82

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{\Omega} (x_{cal} - x_{obs})^2}{\sum_{\Omega} (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2} \quad (1)$$

( $x_{cal}$  и  $x_{obs}$  — рассчитанные и измеренные значения некоторой величины  $x$ ,  $\Omega$  — дискретное множество выборки величины  $x$ ,  $\bar{x}_{obs}$  — среднее по выборке  $\Omega$  значение величины  $x_{obs}$ ), но и соблюдения условия, что систематическая ошибка расчетов не должна превышать 5%.

## ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Полученные оптимальные значения параметров использовались для расчетов суточных значений стока для выбранных рек за периоды, обычно значительно превышающие периоды калибровки (24 года для р. Оленек и 26 лет для р. Индигирки) (табл. 1). Оценка полученных при моделировании результатов осуществлялась по трем статистическим критериям соответствия рассчитанных и измеренных суточных значений стока: систематической ошибке *Bias*, равной разности между рассчитанными и измеренными средними значениями стока, коэффициенту корреляции *Corr* и эффективности расчета *Eff*. Обычно полагают, что при  $Eff > 0.5$  модель достаточно хорошо воспроизводит динамику  $x$  (при  $Eff = 1$  расчет следует признать идеальным), если  $Eff < 0$ , то временная изменчивость  $x$  воспроизводится плохо (в этом случае даже простое осреднение наблюдаемых значений лучше модельного расчета). Здесь

уместно вспомнить, что при разработке методик прогнозов стока иногда принимают следующую шкалу оценки их точности [1]: “хорошая” точность при  $Eff \geq 0.75$  и “удовлетворительная” при  $0.36 < Eff < 0.75$ .

На рис. 4 и 5 приведены примеры сопоставления рассчитанных с использованием оптимизированных параметров и измеренных гидрографов суточного стока рек Оленек и Индигирка за расчетный период. В табл. 1 даны статистические характеристики сопоставления измеренных и рассчитанных суточных слоев стока этих рек.

Приведенные на рис. 4 и 5 и в табл. 1 результаты свидетельствуют о том, что для р. Оленек при оптимизации как 8, так и 11 модельных параметров качество расчета многолетнего гидрографа стока можно признать удовлетворительным (при оптимизации 11 параметров качество расчетов, конечно, выше) и даже в какой-то мере близким к оценке “хорошо”. Однако несколько занижены по сравнению с данными наблюдений расчетные пики стока в период весеннего половодья (рис. 4) и завышен средний объем стока (табл. 1). Здесь необходимо отметить, что ошибки измерений стока в экстремальных условиях Якутии довольно велики (в период половодья могут достигать 30–40%). Качество расчетов стока для р. Индигирки (при оптимизации даже 8 модельных параметров) находится в области оценок “хорошо”. Поэтому для этой реки оптимизация при использовании набора из 11 модельных параметров, которая могла

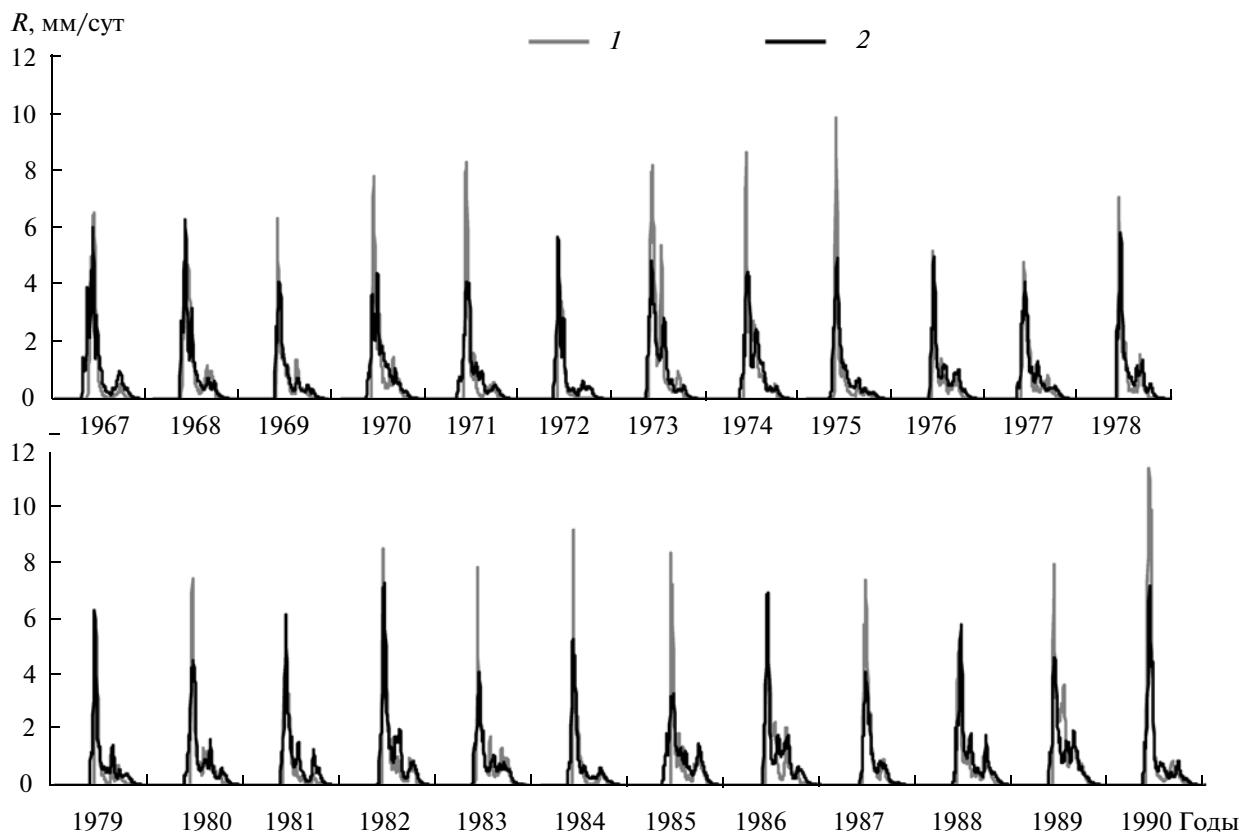


Рис. 4. Измеренные (1) и рассчитанные (2) гидрографы суточного стока  $R$  р. Оленек на стоковой станции в 7.5 км от устья р. Бур (Пур). Оптимизация 11 модельных параметров.

бы, возможно, немного улучшить качество расчетов стока, даже не проводилась.

Следует отметить более сглаженную форму гидрографа стока у р. Индигирки, чем у р. Оленек. По всей вероятности, это связано с расположением бассейнов рек. Большая часть бассейна р. Оленек имеет протяженность в широтном направлении (рис. 2), что приводит к более близким срокам начала снеготаяния в различных частях бассейна и, соответственно, — к более значительным пикам стока в замыкающем створе. Бассейн же р. Индигирки, наоборот, более вытянут в меридиональном направлении (рис. 3), и снеготаяние в различных частях бассейна начинается в разное время, в результате чего гидрограф стока получается более сглаженным.

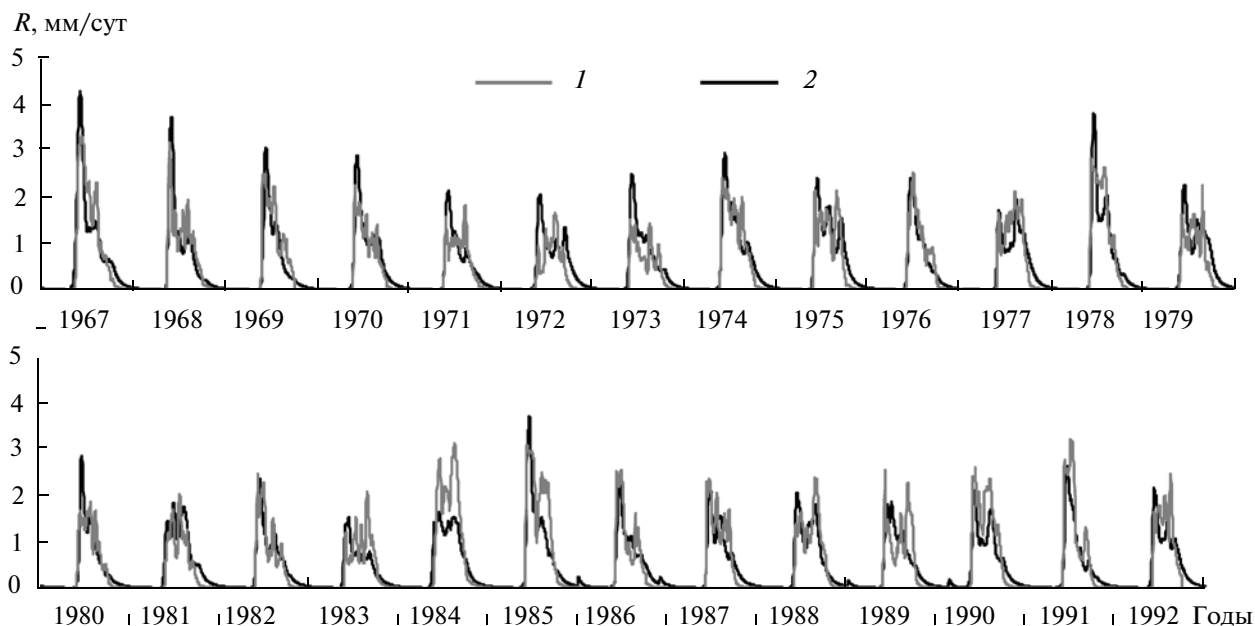
Во многих гидрологических и, особенно, климатических задачах представляют интерес не суточные, а месячные значения стока. Поэтому в табл. 2 приведены также значения статистических критериев соответствия измеренных и рассчитанных за весь выбранный временной период месячных значений стока обеих рек, которые, есте-

ственно, демонстрируют лучшие показатели качества расчетов, чем для суточных величин.

Сравнение полученных на основе использования модели SWAP результатов расчета стока рек Оленек и Индигирка с приведенными в [26] результатами моделирования стока указанных рек с использованием всемирно известной модели Variable Infiltration Capacity (VIC) [22] (широко используемой в США для решения практических и научных задач в области гидрологии суши и представляющей собой макромасштабную гидрологическую модель с элементами модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой) показало, что качество расчетов стока исследуемых рек с использованием обеих моделей довольно близко, хотя воспроизведение стока указанных рек на основе модели SWAP, согласно статистическим критериям, все же немного лучше (табл. 2).

Анализ полученных в исследовании результатов дает положительные ответы на оба поставленных в работе вопроса. Во-первых, модель тепло- и влагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP в сочетании с информацион-





**Рис. 5.** Измеренные (1) и рассчитанные (2) гидрографы суточного стока  $R$  р. Индигирки в районе стоктовой ст. Воронцово. Оптимизация восьми модельных параметров.

ным обеспечением, основанным на глобальных базах данных по параметрам подстилающей поверхности и на данных наблюдений метеорологических станций, при проведении оптимизации нескольких наиболее важных модельных параметров позволяет достаточно хорошо воспроизводить сток северных рек, бассейны которых на-

ходятся в самых экстремально суровых климатических условиях. Во-вторых, даже при очень редкой сети метеорологических станций, обеспечивающих входную информацию для расчета стока рассмотренных рек, проведение оптимизации основных параметров подстилающей поверхности их бассейнов позволяет добиться достаточно

**Таблица 2.** Статистические характеристики соответствия рассчитанных и измеренных месячных значений стока рек Оленек и Индигирка на основе моделей SWAP и VIC

Река	Речной створ или стоктовая станция	Годы	$Eff$	$Bias, \%$	$Corr^{**}$
Модель SWAP					
Индигирка**	Воронцово	1967–1992	0.86	1.1	0.93
Оленек**	7.5 км от устья р. Бур (Пур)	1967–1990	0.85	7.5	0.93
Оленек***	7.5 км от устья р. Бур (Пур)	1967–1990	0.89	12.8	0.95
Модель VIC [26]					
Индигирка	Воронцово	1979–1999	0.83	6.2	—
Оленек	7.5 км от устья р. Бур (Пур)	1979–1999	0.85	14.9	—

\* Данные по характеристике  $Corr$  в [26] отсутствуют.

\*\* 8 калибровочных параметров.

\*\*\* 11 калибровочных параметров.

хорошего соответствия между смоделированными и измеренными гидрографами суточного речного стока.

### ВЫВОДЫ

Показано, что модель тепло- и влагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP в сочетании с информационным обеспечением, основанным на глобальных базах данных по параметрам подстилающей поверхности и метеорологической информации, полученной по данным наблюдений метеорологических станций, достаточно хорошо воспроизводит гидрографы суточного стока рек Оленек и Индигирка, характеризующихся самыми экстремально суровыми климатическими условиями на планете (исключая Антарктиду).

Редкость сети станций метеорологических наблюдений при использовании описанной выше методики не является непреодолимым препятствием для приемлемого воспроизведения суточных значений стока при условии калибровки наиболее важных параметров, используемых в модели SWAP, а в случае необходимости — и поправочных множителей к осадкам и приходящей к подстилающей поверхности радиации.

Авторы выражают признательность сотрудникам Центра данных по глобальному речному стоку (The Global Runoff Data Centre, D – 56068 Koblenz, Germany (Кобленц, Германия)) за предоставленные материалы по речному стоку рек Индигирка и Оленек.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аполов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 366 с.
2. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Параметризация процессов тепловлагообмена в системе “грунтовые воды–почва–растительный/снежный покров–атмосфера” для территорий с четко выраженной сезонной изменчивостью климата // Почвоведение. 2000. № 6. С. 733–748.
3. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Параметризация процессов тепловлагообмена в бореальных лесных экосистемах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 2. С. 182–200.
4. *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.
5. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
6. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.* Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 133–145.
7. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.* Воспроизведение гидрографов стока р. Печоры на основе модели тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 186–198.
8. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э.* Использование модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой для расчетов речного стока в высоких широтах // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 181–195.
9. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э.* Моделирование стока р. Северной Двины с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP и глобальных баз данных // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 439–453.
10. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э.* Моделирование составляющих теплового и водного балансов поверхности суши земного шара // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 664–676.
11. Изменение климата и водные ресурсы. Технический документ МГЭИК / Под ред. Бэйтс Б.К., Кундцевич З.В., Палютикоф Ж.П. Женева: Секретариат МГЭИК, 2008. 228 с.
12. *Boone A., Habets F., Noilhan J. et al.* The Rhone-aggregation land surface scheme intercomparison project: An overview // J. Climate. 2004. V. 17. P. 187–208.
13. Climate change. The IPCC assessment / Eds. Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 320 p.
14. Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC assessment / Eds. Houghton J.T., Callande B.A., Varney S.K. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 200 p.
15. Climate change 1995: The science of climate change: contribution of Working Group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A. et al. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 572 p.
16. *Dirmeyer P., Gao X., Oki T.* The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan // IGPO Publ. Series. Silver Spring: International GEWEX Project Office, 2002. № 37. 75 p.
17. *Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.K.* Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models // Water Resour. Res. 1992. V. 28. № 4. P. 1015–1031.
18. *Gusev Ye.M., Nasonova O.N.* The simulation of heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP // J. Hydrol. 2003. V. 280. № 1–4. P. 162–191.
19. *Gusev Ye.M., Nasonova O.N.* Parameter Optimization for Simulating Runoff from Highlatitude River Basins Using Land Surface Model and Global Data Sets // Stochastic Optimization – Seeing the Optimal for the

- Uncertain / Ed. Ioannis Dritsas. Rijeka (Croatia): In-Tech., 2011. P. 413–440.
20. *Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ya.* Modeling River Runoff in Northwestern Russia with the Use of Land Surface Model SWAP and Global Databases // *Water Resources*. 2011. V. 38. № 5. P. 571–582.
  21. *Loaiciga H.A., Valdes J.B., Vogel R. et al.* Global warming and the hydrologic cycle // *J. Hydrol.* 1996. V. 174. P. 83–127.
  22. *Liang X., Lettenmaier D.P., Wood E.F., Burges S.J.* A Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMs // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № D7. P. 14415–14428.
  23. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models: 1. A discussion of principles // *J. Hydrol.* 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.
  24. *Oki T., Nishimura T., Dirmeyer P.* Assessment of annual runoff from land surface models using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) // *J. Meteorol. Soc. of Japan*. 1999. V. 77. № 1B. P. 235–255.
  25. *Shmakin A.B.* The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // *Global Plan. Change*. 1998. V. 19. № 1–4. P. 49–62.
  26. *Su F., Adam J.C., Bowling L.C., Lettenmaier D.P.* Streamflow simulations of the terrestrial Arctic domain // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № D08112. doi:10.1029/2004JD005518
  27. *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.