

О.М. МАКАРЬЕВА*, **, **Н.В. НЕСТЕРОВА****, ***, **Л.С. ЛЕБЕДЕВА***, **Т.А. ВИНОГРАДОВА****, ****

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск,
ул. Мерзлотная, 36, Россия, omakarieva@gmail.com, lyudmilaslebedeva@gmail.com

**Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская
набережная, 7/9, Россия, omakarieva@gmail.com, nnesterova1994@gmail.com, vinograd1950@mail.ru

***Государственный гидрологический институт, 199004, Санкт-Петербург, 3-я линия, 23, Россия,
nnesterova1994@gmail.com

****Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», 199178, Санкт-Петербург,
14-я линия Васильевского острова, д. 97, лит. А, пом. 3-Н, Россия, vinograd1950@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕК ВЫСОКОГОРНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ (НА ПРИМЕРЕ ХРЕБТА СУНТАР-ХАЯТА)

Разработаны методы моделирования гидрологических процессов для различных горных ландшафтов зоны распространения многолетней мерзлоты с учетом влияния переменных состояний и водно-теплового режима деятельного слоя на процессы формирования стока, применимые в условиях крайней недостаточности данных наблюдений. В качестве объекта исследования принят водосбор р. Сунтар (7680 км², перепад высот 830–2794 м, зона сплошной многолетней мерзлоты, верховья р. Индигирки). Для моделирования бассейн р. Сунтар разбит на четыре стокоформирующих ландшафта: гольцовый комплекс, пояс горной тундры, тайга, заболоченные редколесья и луговые болота. На основе данных наблюдений на высокогорной станции Сунтар-Хаята по программе Международного Геофизического года в 1957–1959 гг. разработаны параметры гидрологической модели «Гидрограф», описывающие процессы формирования стока в высокогорной гольцовой зоне (высота >1900 м). Моделирование характеристик снежного покрова, температуры грунтов на различных глубинах в гольцовой зоне, а также гидрографов стока в замыкающем створе р. Сунтар показало удовлетворительное согласие с данными наблюдений. Модельные расчеты позволили оценить среднемноголетние величины элементов водного баланса различных ландшафтов и их вклад в формирование стока, а также предложить уточнения справочных величин среднемноголетних годовых осадков и испарения для района исследования. Показано, что модель «Гидрограф» применима для моделирования термического состояния грунтов и процессов формирования стока на масштабах от единичной почвенной колонки до среднего речного бассейна в горной криолитозоне при недостаточности информации.

Ключевые слова: высокогорная станция Сунтар-Хаята, гидрологическая модель «Гидрограф», многолетняя мерзлота, зависимость осадков от высоты местности, водный баланс, стокоформирующий комплекс.

О.М. MAKARIEVA*, **, **N.V. NESTEROVA****, ***, **L.S. LEBEDEVA***, **T.A. VINOGRADOVA****, ****

*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
677010, Yakutsk, ul. Merzlotnaya, 36, Russia, omakarieva@gmail.com, lyudmilaslebedeva@gmail.com

**St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya nab., 7/9, Russia,
omakarieva@gmail.com, nnesterova1994@gmail.com, vinograd1950@mail.ru

***State Hydrological Institute, 199004, St. Petersburg, Tretya liniya, 23, Russia,
nnesterova1994@gmail.com

****Gidrotehproyekt Ltd., 199178, St. Petersburg, Chetyrnadtsataya liniya Vasilievskogo ostrova,
d. 97, lit. A, pom. 3-N, Russia, vinograd1950@mail.ru

MODELING RUNOFF FORMATION PROCESSES IN THE HIGH-MOUNTAIN PERMAFROST ZONE OF EASTERN SIBERIA (A CASE STUDY OF SUNTAR-KHAYATA RANGE)

Methods have been developed for modeling hydrological processes for various mountain landscapes of the permafrost zone having regard to the influence of variable states and water-thermal regime of the active layer on the runoff formation processes which are applicable in conditions of an extreme insufficiency of observational data. The catchment of the Suntar river (7680 km²,

elevation range 830–2794 m, continuous permafrost zone, upper reaches of the Indigirka river basin) was used as the object for study. For modeling purposes, the Suntar River basin was schematized into four runoff formation landscapes: the goletz complex, the belt of mountain tundra, taiga, swampy woodlands and meadow bogs. Based on observational data from the Suntar-Khayata high-mountain station within the program of the International Geophysical Year (1957–1959), we developed the parameters in terms of Hydrograph hydrological model describing the runoff formation processes in the high-mountain goletz zone (elevation >1900 m). Results from modeling the characteristics of snow cover, temperature of ground at different depths in the goletz zone and streamflow hydrograph in the outlet section of the Suntar river showed a good agreement with observational data. Model calculations made it possible to estimate the mean long-term values of the water balance elements for different landscapes and their contribution to runoff formation as well as to suggest updates of the reference values of mean long-term precipitation and evaporation for the study area. It is shown that the Hydrograph model is applicable for modeling the thermal state of soils and runoff formation processes on scales from a single soil column to an average-scale river basin in the mountain permafrost zone where information is insufficient.

Keywords: Suntar-Khayata high-mountain station, Hydrograph hydrological model, permafrost, elevation-dependence of precipitation, water balance, runoff formation complex.

ВВЕДЕНИЕ

Горные районы Восточной Сибири отличаются разнообразием ландшафтов, рельефа, климатических условий и, как следствие, доминирующих гидрологических процессов. Роль ландшафтов при моделировании характеристик приповерхностной мерзлоты и процессов формирования стока часто игнорируется, хотя их определяющее значение показано многими исследованиями [1].

Новизна исследования, основанного на использовании гидрологической модели «Гидрограф» [2], заключается в том, что анализ и количественную оценку водно-теплового режима мерзлых грунтов и процессов формирования стока предлагается проводить в масштабе, сопоставимом с масштабом процесса: сначала рассматривается единичная почвенная колонка, потом делается переход к элементарному склону или типичному ландшафту, затем моделирование на малом водосборе и перенос параметров на средние и крупные бассейны. На каждом этапе результаты моделирования верифицируются относительно данных наблюдений, полученных, к примеру, на стационарах и экспериментальных площадках. Это позволяет проследить адекватность рассчитанных величин по отношению к естественным условиям, а также перенести оцененные параметры с исследованных водосборов на неизученные водосборы со сходными условиями.

Основной целью исследования является разработка и апробация методов моделирования гидрологических процессов для различных горных ландшафтов зоны распространения многолетней мерзлоты с учетом в явном виде влияния переменных состояний и водно-теплового режима деятельного слоя на процессы формирования стока, применимых в условиях крайней недостаточности данных наблюдений. В работе использованы отчетные материалы комплексных наблюдений на Высокогорной станции Сунтар-Хаята по программе Международного геофизического года из архива Института мерзлотоведения СО РАН в Якутске [3–7].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования принят водосбор р. Сунтар (площадь 7680 км²) в створе, находящемся в устье р. Сахарыньи. Река Сунтар берет начало на хр. Сунтар-Хаята (рис. 1). Сливаясь с р. Агаякан, она образует р. Кюэнте, представляющую собой левый приток р. Индигирки. Выбор обусловлен наличием специальных данных наблюдений — в бассейне р. Сунтар в период 1957–1959 гг. в рамках программы Международного геофизического года функционировала Высокогорная станция Сунтар-Хаята, на которой проводились гляциологические, геоморфологические и геокриологические наблюдения [8].

Территория исследования относится к зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, ее мощность под водоразделами составляет 400–600 м, под речными долинами — 200–300 м [9].

Высокие пики хр. Сунтар-Хаята (гора Мус-Хая, 2959 м над ур. моря) сочетаются с расчленением их склонов речными долинами. Средняя высота водосбора р. Сунтар составляет 1410 м, достигая максимальной отметки в 2794 м.

Климат исследуемого района резко континентальный с наличием высотной поясности и температурных инверсий. Среднегодовая температура на станциях Сунтар-Хаята (2068 м над ур. моря) за период 1957–1964 гг. и Агаякан (776 м над ур. моря) за 1957–2012 гг. составила –13,8 и –14,1 °С (в июле — 6,4 и 17,5 °С, в январе — –28,0 и –39,6 °С) соответственно.

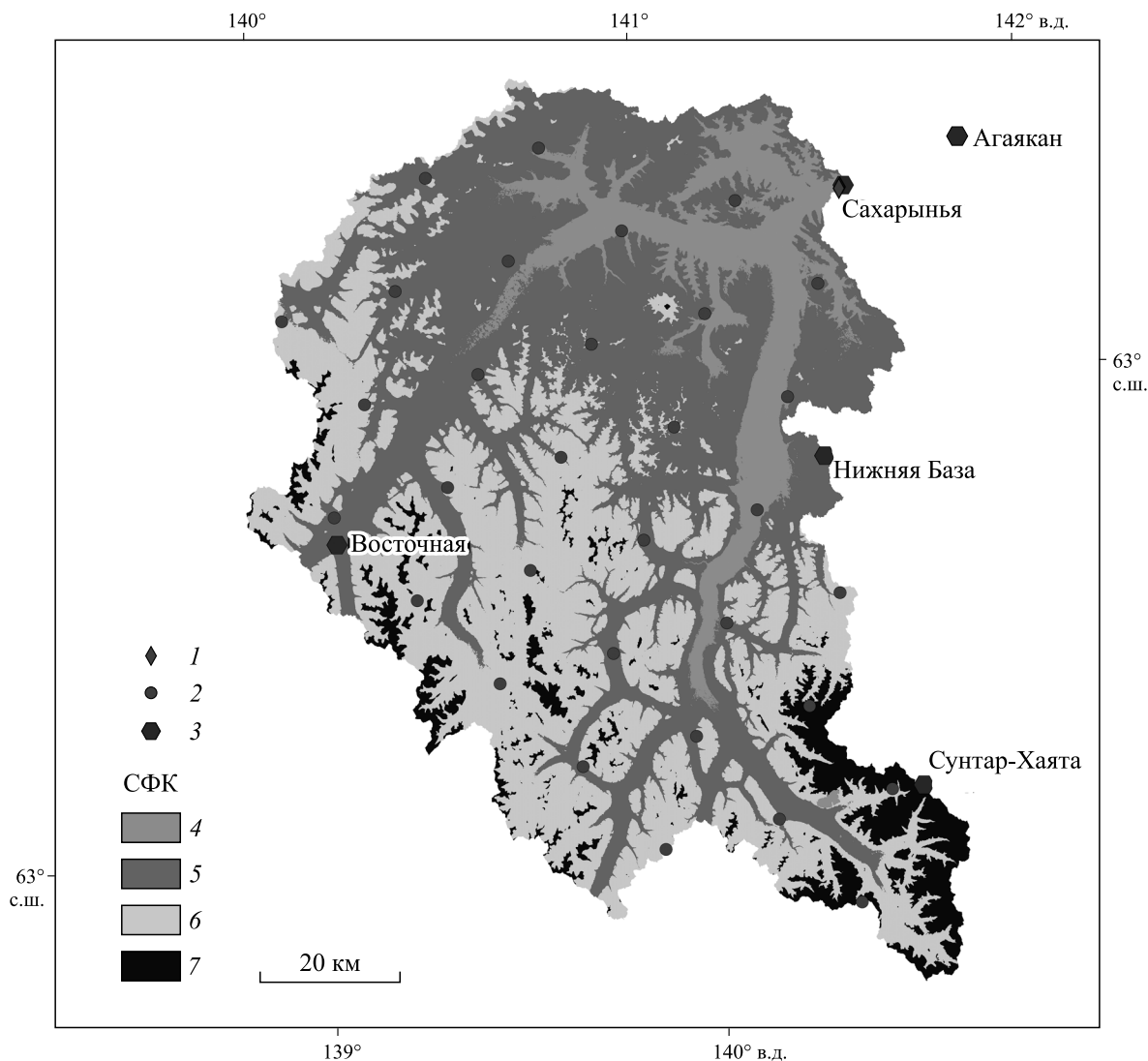


Рис. 1. Карта-схема водосбора р. Сунтар до створа в устье р. Сахарынья.

1 — замыкающий створ; 2 — метеостанция и метеопост; 3 — репрезентативные точки; 4 — заболоченные редколесья; 5 — лиственничная тайга; 6 — горная тайга; 7 — гольцы и ледники.

Снежный покров устанавливается на хребте в сентябре. В зимний период сток отсутствует. Наибольший сток фиксируется в летние месяцы. В среднем начало половодья приходится на третью декаду мая. В бассейне р. Сунтар, сложенном почвогрунтами с низкой инфильтрационной способностью, роль подземного стока небольшая [8].

В истоках р. Сунтар находится ледник № 31 площадью 8,48 км², что составляет 0,11 % территории водосбора. Ледниковый сток в районе исследования может превышать 3,8 % суммарного годового и достигать 6,1 % стока за июль и август, как, например, в соседнем бассейне р. Агаякан, где ледники занимают площадь более 1,35 % [10]. В последние десятилетия отмечается устойчивая тенденция сокращения оледенения хр. Сунтар-Хаята [11].

Отличительная черта района — это распространение наледей. Для бассейна р. Сунтар наледность достигает 0,5 %, а участие наледных вод в формировании годового речного стока оценивается примерно в 7 %. Наиболее существен приток воды от таяния наледей в мае–июне [12].

Широкое распространение на склонах хребта Сунтар-Хаята получили многолетние снежники [10] и каменные глетчеры, которые, наряду со льдом деятельного слоя и непосредственно летними атмосферными осадками, могут представлять собой важный источник питания местных рек, однако в этом отношении они исследованы недостаточно [11, 13].

Водный баланс исследуемой территории изучен слабо. Оценки величин составляющих водного баланса — осадков и испарения — для высокогорных районов истоков рек Яны и Индигирки, опубликованные в справочных материалах по гидрометеорологии [10, 14], выполнены в том числе на основе данных наблюдений за стоком рек на высокогорной станции Сунтар-Хаята в 1957–1964 гг. и в значительной степени противоречивы.

На основе данных [14] нами построены зависимости увеличения количества осадков с высотой для теплого (май–август) и холодного (сентябрь–апрель) периодов года (рис. 2). Годовое количество осадков на станции Сунтар-Хаята более чем в два раза превышает количество осадков, выпадающих в предгорьях. Градиент количества осадков в диапазоне высот 777–1350 и 1350–2068 м над ур. моря составляет 7 (5–7 %) и более 35 мм (15–16 %) на 100 м соответственно. На основе данных снегомерных съемок Граве и Корейша [5] показали, что в среднем за 1957–1959 гг. между высотами 2068–2257 и 2257–2477 м над ур. моря градиенты увеличения осадков с высотой устойчивы и составили 35 (5–8 %) и 30 мм (4–5 %) на 100 м соответственно. Количество твердых осадков на высоте 777 м над ур. моря составляет около 25 % от годовой суммы, на высоте 2068 м над ур. моря — около 60 %. При линейной экстраполяции по этим двум точкам процентное содержание твердых осадков на высоте 2900 м над ур. моря достигает 90 % от годовой суммы [5].

В среднем за период 1957–1964 гг. годовое количество осадков на станции Сунтар-Хаята по показаниям осадкомера составило 555 мм. Однако в [14] рекомендуется введение поправок на ветровой недоучет и смачивание прибора, достигающих значений 1,7 (в среднем 1,6) для твердых и 1,3 (в среднем 1,16) для жидких осадков, что приводит к оценкам годового количества осадков на высоте 2068 м над ур. моря в 688 мм [14] и 800 мм на вершинах хребтов [15, 16].

Среднегодовой слой стока р. Сунтар в створе, находящемся в устье р. Сахарыньи (средняя высота 1410 м над ур. моря), за период наблюдений 1957–1964 гг. составил 180 мм, за весь период наблюдений до 2014 г. — 186 мм, максимальный расход — 1910 м³/с. За те же периоды сток р. Сахарыньи, небольшого притока р. Сунтар (средняя высота водосбора 1110 м), составил 71 и 98 мм соответственно. При оценке реальной величины слоя стока необходимо учитывать такой феномен, как дренирование воды в руслах горных рек, характерное для района. Это явление отмечается, например, в описании створа р. Сахарыньи [10]. Также отмечено [17], что важный фактор формирования стока половодья Северо-Востока России — это поступление воды в осушенные зимой аллювиальные отложения, которые перехватывают часть талого стока.

Годовая величина испарения 200–250 мм для района исследования, опубликованная в [10], очевидно, рассчитана как разность количества осадков (с описанными выше поправочными коэффициентами) и стока воды. Такая оценка величины испарения, как и поправочные коэффициенты к зимним

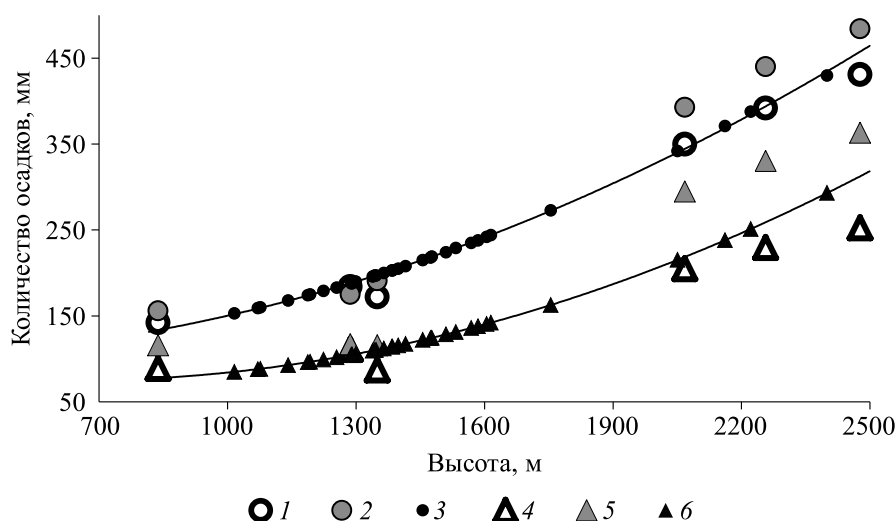


Рис. 2. Изменение осадков с высотой местности за зимний и летний период.

Осадки: 1 — жидкие фактические на мст, 2 — жидкие с поправками на мст, 3 — жидкие на репрезентативных точках, 4 — твердые фактические на мст, 5 — твердые с поправками на мст, 6 — твердые на репрезентативных точках.

осадкам, представляются авторам исследования значительно завышенными и не соответствующими действительности. Например, по данным наблюдений и результатов моделирования на водотоках Колымской водно-балансовой станции, годовое значение испарения в схожих, но более благоприятных, условиях составляет менее 150 мм [18].

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ БАССЕЙНА РЕКИ СУНТАР

Выбор модели процессов формирования стока «Гидрограф» [2] в качестве инструмента исследования обусловлен рядом ее преимуществ. Модель содержит алгоритмы, описывающие динамику тепла и влаги в почвенном профиле, включающем деятельный слой, в зависимости от их физических свойств [19]. Нетребовательность модели к входной метеорологической информации (температура и влажность воздуха, осадки) позволяет рассчитывать сток на малоизученных бассейнах.

Параметризация модели «Гидрограф» проводилась на основе совместного анализа гидротермического режима почвогрунтов и закономерностей стокоформирования в типичных ландшафтах [18]. В целях моделирования проведено разделение водосбора на стокоформирующие комплексы (СФК) или основные типы подстилающей поверхности (ландшафты). Параметры модели характеризуют СФК в целом, неизменны в его пределах и скачкообразно изменяются на его границах [2].

Согласно высотной поясности, водосбор р. Сунтар разбит на четыре СФК (см. рис. 1). Для каждого из них разработана схематизация вертикального профиля, учитывающая состав грунта, растительность, процессы снегонакопления и стокоформирования.

Гольцовый комплекс (1) расположен в высотной зоне 1900–2700 м над ур. моря (средняя высота 2040 м над ур. моря), его доля составляет 7 % от площади водосбора р. Сунтар.

Почвенный профиль комплекса сложен крупнообломочным щебнем аргиллитов (удельный вес 2920 кг/м³), цементированных льдом и включающих прослойки чистого льда толщиной до 2 м. Растительность отсутствует. Щебень представляет собой разрушенные морозным выветриванием ледниковые валуны и делювий склонов долины с примесью суглинистого материала. Глубина сезонного протаивания почвогрунтов в пределах гольцового комплекса на высотных отметках более 1700 м над ур. моря колеблется от 55 до 75 см [8]. Для верхнего слоя делювия характерна незначительная влажность и малозаметные колебания ее содержания в течение теплого сезона, несмотря на значительное количество осадков и неравномерность в их выпадении. Это объясняется хорошими фильтрационными способностями щебнистых грунтов. Неиспарившаяся влага легко просачивается в глубину и стекает по мерзлому водоупору. Неудачный опыт сооружения стоковой площадки показал, что водоупор представляет сложную поверхность благодаря наличию глубоких трещин и пустот, хотя и имеющих отрицательную температуру, но не заполненных льдом [3].

Пояс горной тундры (2) соответствует высотам 1450–1900 м над ур. моря (средняя высота 1630 м над ур. моря) и занимает 37 % бассейна. Он характеризуется распространением сомкнутого и угнетенного травянисто-мохового покрова с кустарничками. Верхний 10-сантиметровый слой профиля горной тундры составляет моховой покров, под которым залегает горная порода с включениями загрязненного льда. Сезонно-талый слой в горной тундре составляет 80–90 см.

Тайга (3) (1100–1450 м над ур. моря, средняя высота — 1310 м над ур. моря) состоит из разреженного лиственничника на северных склонах и густых лиственничных лесов на южных склонах и занимает 42 % площади водосбора.

Заболоченные редколесья и луговые болота (4) приурочены к долинам и поймам рек (828–1100 м над ур. моря, средняя высота 1060 м над ур. моря) и занимают 14 % площади водосбора. Отличительная черта лиственничной тайги и поймы на заболоченных грунтах — это наличие торфяного горизонта, который находится под моховым покровом и распространяется до глубин 20 и 40 см соответственно. Данный слой характеризуется низкими теплопроводными свойствами, повышенной пористостью и водоудерживающей способностью. Глубина сезонного протаивания изменяется в пределах 85–150 см в тайге и 30–115 см в долинах и поймах рек.

Для моделирования вся площадь водосбора покрыта гексагональной сеткой, узлами которой стали 32 репрезентативные точки (РТ). Из них 3 точки соответствуют гольцовому комплексу, 11 — тундре, 13 — тайге и 5 — заболоченным редколесьям и луговым болотам.

Предположение, что процессы формирования стока в горных районах верховьев р. Колымы и в бассейне р. Сунтар схожи, основывается на параметрах для второго-четвертого СФК, которые были заимствованы из [18], где использованы данные Колымской водно-балансовой станции для их определения. Параметризация гольцового ландшафта рассмотрена в следующем разделе более подробно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ГОЛЬЦОВОГО ЛАНДШАФТА

В качестве входной метеорологической информации для моделирования задаются суточные значения температуры и влажности воздуха, количества осадков для каждой станции в пределах или вблизи водосбора. Данные четырех метеостанций: Сунтар-Хаята, Нижняя База, Агаякан и Восточная методом триангуляции интерполировались в каждую РТ. При интерполяции осадков суточные величины нормировались согласно построенным зависимостям количества жидких и твердых осадков от высоты местности на метеорологических станциях (см. рис. 2). При интерполяции температуры и дефицита влажности воздуха учитывался годовой ход градиента обеих величин с высотой. Среднемесячные годовые градиенты температуры и дефицита влажности воздуха, рассчитанные по данным метеостанции Сунтар-Хаята (2068 м над ур. моря) и Агаякан (776 м над ур. моря), изменяются от 1,1 °С и +0,01 гПа на 100 м в январе до -1,3 °С и -0,35 гПа на 100 м в июне.

Площадка станции Сунтар-Хаята располагалась в гольцовом ландшафте в северном массиве хребта на высоте 2040 м над ур. моря в сквозной ледниковой долине. Здесь проводились наблюдения за снежным покровом и испарением, а также измерения температуры почвогрунтов на различных глубинах. Эти данные были использованы нами для оценки и уточнения параметров, описывающих гольцовый комплекс.

Температура почвы. Геотермические измерения производились на площадке Сунтар-Хаята в трех скважинах на глубинах от 10 см до 20 м. Моделирование температуры грунта с суточным расчетным интервалом на различных глубинах проведено с использованием теплофизических свойств почвогрунтов, обобщенных согласно материалам из отчетов Граве и Корейши [3–6]. Принятые значения среднего объемного веса грунта с пористостью 42 % при естественной влажности, при полном насыщении пор льдом и в сухом состоянии равняются 1700, 1930, 1580 кг/м³ соответственно. Величина удельной теплоемкости частиц грунта в сухом состоянии составляет 840 Дж/(кг·°С), а удельная теплопроводность 1,5 Вт/(м·°С).

Тепловой баланс почвы по слоям рассчитывается в модели «Гидрограф» в каждый расчетный интервал времени — ежедневно. Для верификации результатов расчета теплового баланса деятельного слоя были использованы выявленные среднемесячные значения температуры грунта на нескольких горизонтах (до глубины 2 м) на площадке станции Сунтар-Хаята за 1958 г. Средние абсолютные отклонения рассчитанных месячных температур от зафиксированных величин составили 1,4, 1,5, 1,1 и 0,6 °С, а их максимальные значения — +3,8 °С (июнь), +4 °С (ноябрь), +3,2 °С (июнь) и -1,6 °С (январь) на глубинах 5, 50, 100 и 200 см соответственно. В целом рассчитанные и реальные значения температуры грунта на разных глубинах сопоставимы (рис. 3, а).

Снежный покров. Данные о высоте и запасах снежного покрова на площадке метеорологической станции Сунтар-Хаята использовались для верификации параметров модели «Гидрограф». Мощность снежного покрова измерялась по трем рейкам, установленным по углам треугольника со сторонами 12 м. Водный эквивалент рассчитывался по среднему значению мощности снежного покрова и объемному весу [6]. Сравнение рассчитанных и зафиксированных величин высоты и запасов снежного покрова за зимние сезоны 1958–1959 гг. указывает на адекватность модели (см. рис. 3, б).

На основе данных снегомерных съемок, которые проводились в районе станции на продольном профиле длиной 3 км с амплитудой высот более 400 м, был рассчитан коэффициент вариации снежного покрова, составивший 0,57. Он был использован при моделировании перераспределения снежного покрова в гольцовом ландшафте.

Испарение. Наблюдения за испарением производились с помощью двух почвенных испарителей системы ГГИ-500-50, которые были установлены на площадке станции Сунтар-Хаята в начале июня 1958 г. при сплошном, не начинавшем таять, снежном покрове и при отрицательной температуре грунта. Испарители были заполнены щебнистым грунтом, слагающим площадку, вставлены в вырытые гнезда на всю свою высоту и оставлены под снежным покровом до полного естественного таяния последнего на площадке, происходившего 20–27 июля. Наблюдения за испарением продолжались весь август 1958 г. Взвешивание испарителей производилось один раз в пять дней, выпадающие осадки регистрировались ежесуточно в непосредственной близости к испарителям [3].

Зафиксированные осадки за август 1958 г. составили 77 мм, величина просачивания — 36 мм, среднее значение суммарного испарения равнялось 44 мм. Рассчитанное значение суммарного испарения за август этого же года составило 37 мм, а в среднем за теплый период 1957–1964 гг. — 50 мм. Результаты расчета не противоречат наблюдениям на каменных осыпях гольцового комплекса Колымской водно-балансовой станции, на которых значение среднегодового испарения в диапазоне высот 1200–1700 м над ур. моря (1979, 1983–1984 гг.) составило 72 мм [18].

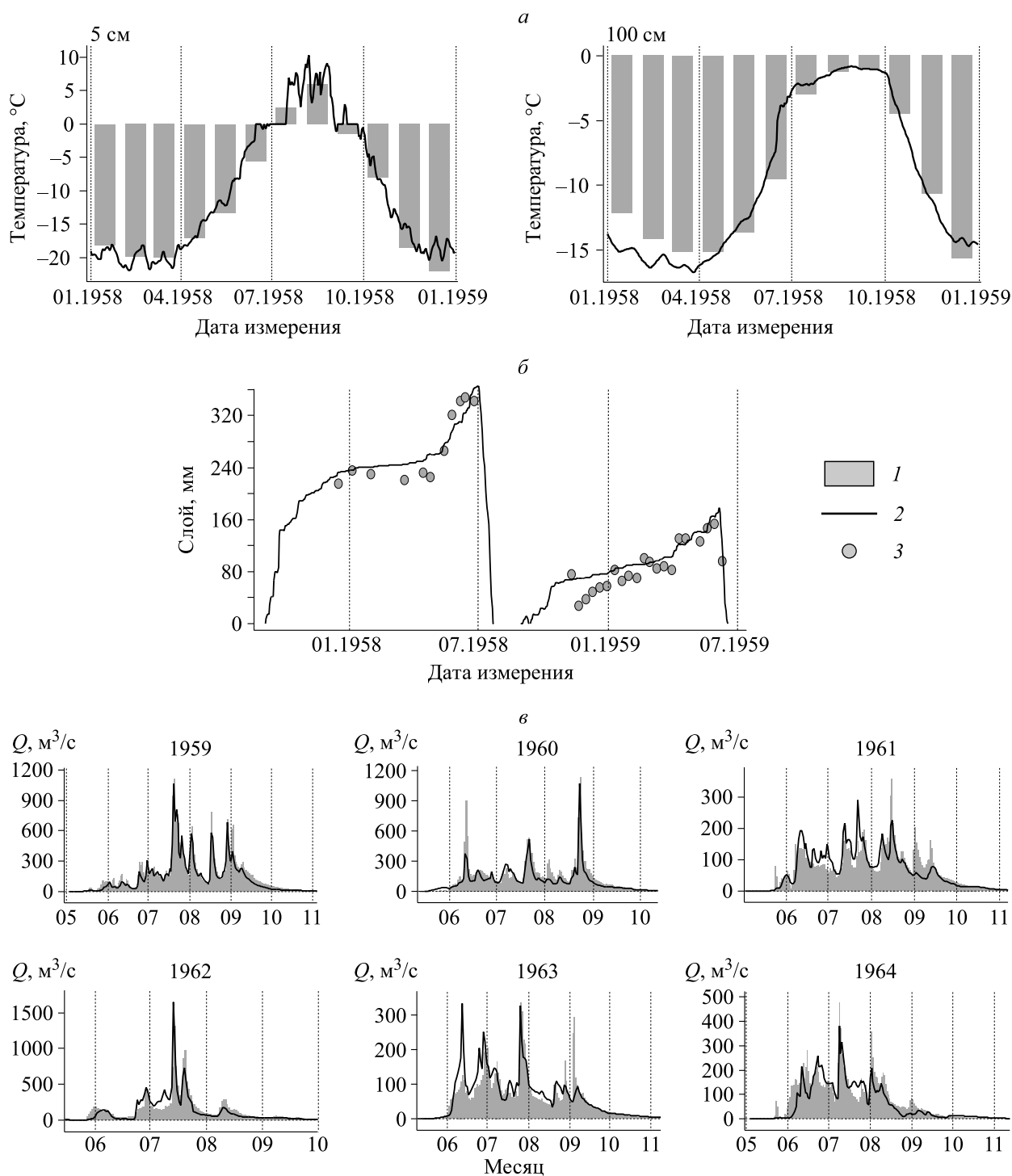


Рис. 3. Результаты моделирования.

a — рассчитанная (суточные величины) и фактическая (среднемесячные значения) температура грунта на глубинах 5 и 100 см, 1958 г.; *б* — рассчитанный и фактический запас воды в снежном покрове, 1958–1959 гг.; *в* — рассчитанные и фактические гидрографы стока воды, р. Сунтар – створ р. Сахарынья, 1959–1964 гг. Показатели: 1 — фактический, 2 — рассчитанный, 3 — фактический запас воды в снежном покрове.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА

Непрерывное моделирование стока с суточным разрешением было произведено для бассейна р. Сунтар в створе, расположенном в устье р. Сахарынья, за 1957–1964 гг. с использованием данных четырех метеорологических станций (см. рис. 1). Основные характеристики водного баланса представлены в таблице, а сравнение реальных и рассчитанных гидрографов стока за 1959–1964 гг. — на рис. 3, в.

При моделировании использовались корректирующие коэффициенты 1,1 и 1,15 к твердым и жидким осадкам соответственно. Результаты анализа материалов отчетов [3–6] и моделирования водного баланса не подтверждают рекомендуемого в [14] корректирующего коэффициента 1,6 к твердым осадкам, авторы исследования считают его неоправданно завышенным.

За период 1957–1964 гг. рассчитанный годовой слой осадков для бассейна р. Сунтар составил в среднем 344 мм, рассчитанный слой стока воды — 199 мм, что в среднем на 10 % выше выявленного (180 мм). Величина испарения с водосбора равна 143 мм, что в полтора раза ниже величины, указанной для района исследования в [10]. Средний критерий эффективности Нэша–Сатклиффа [20] расчета гидрографов в замыкающем створе составил 0,75. В целом, несмотря на небольшое завышение стока в период половодья, рассчитанные гидрографы стока хорошо совпадают с зафиксированными в процессе наблюдения как по фазам, так и по абсолютным значениям расходов воды.

На основе результатов моделирования произведена оценка элементов водного баланса для каждого СФК, а также рассчитан вклад каждого СФК в формирование стока в замыкающем створе (см. таблицу). На гольцовый комплекс, занимающий 7 % территории водосбора, приходится 20 % общего стока в замыкающем створе р. Сунтар, а коэффициент стока достигает 0,92. Наибольший вклад в формирование стока водосбора р. Сунтар вносят тундры с долей стока 49 % и коэффициентом стока 0,75. Суммарный сток с ландшафтов тайги и заболоченных редколесий, занимающих 56 % территории, составляет около 31 %.

Вклад гольцовых ландшафтов увеличивается в маловодные годы и в бассейне р. Сунтар может достигать 28 % (например, в 1963 г. общий годовой слой стока составил всего 130 мм, а рассчитанный для гольцового комплекса — 513 мм).

Водный баланс СФК в бассейне р. Сунтар, 1957–1964 гг.

Параметры	Общий	Гольцы	Горная тундра	Тайга и заболоченные редколесья
Рассчитанный сток, мм	199	567	263	105
Осадки, мм	344	618	356	292
Испарение, мм	143	50	86	186
Доля площади, %	100	7	37	56
Доля стока, %	100	20	49	31
Коэффициент стока	0,59	0,92	0,75	0,36

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных наблюдений на Высокогорной станции Сунтар-Хаята (верховья р. Индигирки) по программе Международного Геофизического года в 1957–1959 гг. разработаны параметры гидрологической модели «Гидрограф», описывающие процессы формирования стока в высокогорной гольцовой зоне бассейна р. Сунтар. Проведено моделирование переменных состояний снежного покрова и динамики тепла в профиле грунта в гольцовой зоне, а также процессов формирования стока на всем водосборе реки. Результаты моделирования оцениваются как удовлетворительные.

Модельные расчеты позволили оценить среднемноголетние величины элементов водного баланса различных ландшафтов, их вклад в формирование стока воды в замыкающем створе горной реки, а также предложить уточнения справочных величин среднемноголетних годовых осадков и испарения для района исследования.

Суммарно сток с гольцов и горных тундр, занимающих 44 % площади водосбора, в среднем составляет 69 % стока в замыкающем створе р. Сунтар, достигая 75 % в маловодные годы.

В настоящее время в горных районах бассейнов рек Яны, Индигирки и Колымы не осталось ни одной исследовательской станции для комплексного изучения процессов формирования стока в раз-

личных ландшафтах мерзлоты. В связи с этим все более актуальными становятся разработка и верификация методов моделирования гидрологических процессов, применимых в условиях крайней недостаточности информации. В работе показано, что гидрологическая модель «Гидрограф» может стать основой для решения научных и прикладных задач в исследуемом регионе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (15–35–21146).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов А.Н., Гагаринова О.В., Фёдоров В.Н. Ландшафтная гидрология: теория, методы, реализация // География и природ. ресурсы. — 2007. — № 3. — С. 56–67.
2. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. — М.: Академия, 2010. — 298 с.
3. Граве Н.А. Предварительный отчет по исследованиям теплового и влажностного режимов почв и горных пород и теплообмена между ними за 1958 год на площадке Сунтар-Хаята. — Якутск: Изд-во Северо-Вост. отд. Ин-та мерзлотоуедения АН СССР, 1959. — 30 с.
4. Граве Н.А., Корейша М.М. Промежуточный научный отчет о работе Высокогорной гляциологической и геокриологической станции Сунтар-Хаята (по программе 3 МГГ) за 1957 г. — Якутск: Изд-во Северо-Вост. отд. Ин-та мерзлотоуедения АН СССР, 1957. — 40 с.
5. Граве Н.А., Корейша М.М. Отчет об исследованиях станции Сунтар-Хаята за 1959 г. — Якутск; М.: Изд-во Северо-Вост. отд. Ин-та мерзлотоуедения АН СССР, 1960. — 48 с.
6. Корейша М.М. Материалы гляциологических исследований. Сунтар-Хаята. Международный геофизический год 1957–1958–1959. — М.: Изд-во Ин-та мерзлотоуедения АН СССР, 1963. — 105 с.
7. Корейша М.М. Промежуточный отчет о работах экспедиции «Сунтар-Хаята» за 1957. — Якутск: Изд-во АН СССР, 1957. — 22 с.
8. Граве Н.А., Гаврилова М.К., Гравис Г.Ф., Катасонов Е.М., Клюкин Н.К., Корейша Г.Ф., Корнилов Б.А., Чистотинов Л.В. Промерзание земной поверхности и оледенение хребта Сунтар-Хаята (Восточная Якутия). — М.: Наука, 1964. — 141 с.
9. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Ред. Э.Д. Ершов. — М.: Недра, 1989. — 515 с.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17: Дальний Восток. Вып. 1. Лено-Индибирский район / Под ред. А.П. Муранова. — Л.: Гидрометеиздат, 1966. — 646 с.
11. Лыткин В.М. Динамика ледников и каменных глетчеров хребта Сунтар-Хаята в позднем голоцене: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоуедения СО РАН, 2016. — 22 с.
12. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 190 с.
13. Жижин В.И., Железняк М.Н., Пуляев Н.А. Криогенные процессы в формировании морфологии горного рельефа хребта Сунтар-Хаята // Вестн. Северо-Вост. федер. ун-та им. М.К. Аммосова. — 2012. — Т. 9, № 3. — С. 73–79.
14. Справочник по климату СССР. Вып. 24: Якутская АССР. Ч. 4: Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 352 с.
15. Васильев И.С., Торговкин Я.И. Пространственное распределение осадков в Якутии // Метеорология и гидрология. — 2002. — № 6. — С. 23–32.
16. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 8, вып. 0–7: Бассейны морей Лаптевых, Восточно-Сибирского до р. Колымы. 1980 г. — Якутск: Изд-во Якут. гидромет. упр., 1983. — 346 с.
17. Глотова Л.П., Глотов В.Е. Общие закономерности подземного питания рек на Северо-Востоке России // Изв. Самар. научного центра РАН. — 2015. — Т. 17, № 6. — С. 63–69.
18. Лебедева Л.С., Семёнова О.М., Виноградова Т.А. Расчет глубины сезонно-талого слоя в условиях различных ландшафтов Колымской водно-балансовой станции в задаче гидрологического моделирования // Криосфера Земли. — 2015. — Т. 19, № 2. — С. 35–44.
19. Виноградов Ю.Б., Семёнова О.М., Виноградова Т.А. Гидрологическое моделирование: метод расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле (ч. 1) // Криосфера Земли. — 2015. — Т. 19, № 1. — С. 11–21.
20. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: I A discussion of principles // Journ. Hydrol. — 1970. — Vol. 10, N 3. — P. 282–290.

Поступила в редакцию 3 июля 2017 г.