

ГЛУБИНА ПРОТАИВАНИЯ ПОЧВЫ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА В ЗОНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ: АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Л. С. Лебедева¹, О. М. Семенова²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Государственный гидрологический институт

Введение

Целью данного исследования стал анализ факторов, определяющих глубину сезонного протаивания почвогрунтов в зоне многолетней мерзлоты, и оценка ее влияния на процесс формирования речного стока. Актуальность рассматриваемой темы обусловлена возрастающим интересом к арктическим территориям и процессам, протекающим в зоне многолетней мерзлоты. Это связано с глобальными климатическими и антропогенными изменениями, которые оказывают интенсивное воздействие на приполярные районы [11, 12].

Метод *математическое моделирование процессов формирования стока* лежит в основе данного исследования, а именно: была использована детерминированная физически обоснованная распределенная гидрологическая модель «Гидрограф» [4, 5]. Объектом изучения стали данные наблюдений за переменными состояниями малого водосбора ручья Контактного на Колымской водно-балансовой станции (КВБС).

Главные задачи исследования включали в себя систематизацию свойств почвенно-растительного покрова для различных ландшафтов в зоне многолетней мерзлоты, оценку и уточнение физических параметров модели «Гидрограф» на основе данных наблюдений, а также моделирование процессов формирования стока, в том числе протаивания и промерзания деятельного слоя. Принятый подход дает возможность систематизировать параметры, описывающие формирование стока в данных природных условиях, и использовать их для моделирования в сходных районах Северо-Востока России. Этому благоприятствует тот факт, что условия Колымской станции являются репрезентативными для обширной территории Северо-Восточной Сибири [3].

Опыт отечественных исследований в области моделирования стока в районах распространения многолетней мерзлоты [6, 8, 15] показал, что изменения температуры и фазовые переходы в почве оказывают первостепенное влияние на гидрологические процессы, определяя возможности инфильтрации воды в почву и формирование поверхностного, почвенного или подземного стока, поэтому названным процессам в данной работе было уделено основное внимание.

Методы

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ФОРМИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Среди существующих методов расчета динамики тепловой энергии в почве [14] самым распространенным является использование системы одномерных уравнений теплопроводности в частных производных [2, 9]:

$$\rho C \frac{\delta T}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta z} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta z} \right) \quad (1)$$

где ρ – плотность, кг/м³, C – удельная теплоемкость, Дж/кг·°С, T – температура, °С, z – глубина, м, λ – коэффициент теплопроводности почвы, Вт/м·°С.

Уравнения дополняются начальными, граничными условиями и условием фазовых переходов на границе слоев (условие Стефана):

$$\lambda_1 \frac{dT_1}{dz} \Big|_{z=z_{12}} - \lambda_2 \frac{dT_2}{dz} \Big|_{z=z_{12}} = l \rho u \frac{dz_{12}}{dt} \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого слоя, Вт/м·°С, T_1 и T_2 – температура талого и мерзлого слоя, °С, l – удельная теплота плавления (замерзания), Дж/кг, ρ – плотность, кг/м³, u – объемная влажность почвы, %, z_{12} – глубина раздела мерзлого и талого слоя, м. При нали-

ции фазовых переходов в почве количество слоев и, соответственно, количество уравнений в системе непостоянно. Решение данного уравнения находится с помощью выбранной численной схемы с шагом по времени, обычно достаточно малым по сравнению с интересующим нас интервалом.

Кроме того, существует большое количество способов расчета глубины сезонного протаивания мерзлых почв. К ним относится формула Стефана:

$$z = \sqrt{\frac{2\lambda_f(T_s - T_f)}{lu}} \quad (3)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлой почвы, Вт/м·°C, T_s – температура по поверхности, T_f – первоначальная температура в точке промерзания. Другой способ определения глубины деятельного слоя – модель Кудрявцева:

$$z = \frac{2(A_0 - t_z)\sqrt{\frac{\lambda T c}{\pi}} + \frac{(2A_\phi c z_{2c} + z\Theta_\phi)\Theta_\phi\sqrt{\frac{\lambda T}{\pi c}}}{2A_\phi c z_{2c} + \Theta_\phi z + \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi c}}(2A_\phi c + \Theta_\phi)} \quad (4)$$

$$\text{где } z_{2c} = \frac{2(A_0 - t_z)\sqrt{\frac{\lambda T c}{\pi}}}{2A_\phi c + \Theta_\phi} \quad (5) \quad A_\phi = \frac{A_0 - t_z}{\ln \frac{A_0 + \frac{\Theta_\phi}{2c}}{t_z + \frac{\Theta_\phi}{2c}}} \quad (6)$$

где A_0 – годовая амплитуда колебаний температур на поверхности почвы, °C; t_z – среднегодовая температура на подошве слоя сезонного промерзания (протаивания) пород, °C; T – период колебаний, год; c – объемная теплоемкость породы, ккал/м³·°C; A_ϕ – средняя годовая амплитуда на подошве слоя сезонного промерзания (протаивания), °C; Θ_ϕ – удельная теплота плавления породы, Дж/кг.

В последнее время разрабатываются вероятностно-статистические [1] и эмпирико-статистические подходы, связывающие глубины оттаивания почвы со свойствами растительности, снежного покрова и рельефа статистически.

Отметим, что все методы, кроме решения системы уравнений теплопроводности, позволяют определить только глубину оттаивания или наличие многолетней мерзлоты в принципе. Они не подходят для решения задачи расчета динамики тепла в почве в целях моделирования гидрологических процессов, когда необходимо воспроизвести наличие или отсутствие талых и мерзлых слоев по всему почвенному разрезу на каждый расчетный интервал времени. Использование громоздких численных схем для решения уравнения теплопроводности является излишним усложнением модели при наличии упрощенных методов расчета, значительно не уступающих в точности [4].

МОДЕЛЬ «ГИДРОГРАФ»

В работе использовалась модель формирования стока «Гидрограф», разработанная Ю. Б. Виноградовым [4, 5, 16]. Она является единой комплексной универсальной системой с распределенными параметрами, объединяющей в себе все виды стока, применимой для моделирования процессов формирования стока в бассейнах любых масштабов, расположенных в любых природных зонах, и учитывающей региональные особенности протекания изучаемых процессов параметрически. Концепции, положенные в основу моделирующей системы, ее алгоритмы и особенности достаточно подробно изложены в [4, 5, 16].

Входом служит суточная метеорологическая информация – слой осадков, температура и дефицит влажности воздуха; результатом моделирования являются гидрографы стока воды в замыкающем створе, переменные состояния водосбора в расчетных точках, такие как температура и влажность почвы, высота, запас воды и плотность снежного покрова за каждые сутки, и элементы водного баланса бассейна за каждый расчетный год.

Математическое описание процессов формирования стока на водосборе включает в себя: формирование, таяние и водоотдачу снежного покрова, поверхностное задержание, динамику тепла и влаги, фазовые переходы в почве, поверхностное, почвенное и подземное стокообразование, испарение, склоновую и русловую трансформацию стока.

Для описания динамики тепла в почве в модели формирования стока «Гидрограф» используется система обыкновенных дифференциальных уравнений [4]:

$$\frac{dU_i}{dt} = \xi_{i-1,i} (\theta_{i-1} - \theta_i) - \xi_{i,i+1} (\theta_i - \theta_{i+1}) \quad (9)$$

где U_i – количество тепловой энергии, содержащейся в i -м слое почвы на единичной площади, Дж/м²; ξ_i – коэффициент теплообмена, Вт/м²·°С. В этом случае пространственный шаг является интервалом осреднения, и профиль температуры по глубине представляет собой ступенчатую гистограмму. Предполагается, что тепловые потоки из слоя в слой пропорциональны разности их температур, для верхнего слоя – разности с температурой воздуха. Коэффициент пропорциональности (теплообмена) между двумя слоями почвы связан с их коэффициентами теплопроводности λ , Вт/м·°С:

$$\xi_{i,i+1} = 2(\Delta z_i / \lambda_i + \Delta z_{i+1} / \lambda_{i+1}) \quad (10)$$

где Δz_i – толщина выделенного слоя почвы, м. Температура на нижней границе нижнего расчетного слоя θ_{zp} определяется соотношением:

$$\theta_{zp} = k_l \theta_{const} + (1 - k_l) \theta_n \quad (11)$$

где θ_{const} – известная температура на какой-то определенной постоянной глубине ниже нижнего расчетного слоя почвы, °С, k_l – весовой безразмерный коэффициент, зависящий от разницы глубин постоянной температуры и нижнего расчетного слоя. За θ_{const} в зависимости от наличия информации обычно принимается средняя многолетняя температура на глубине 1,6 или 3,2 м, описываемая синусоидой:

$$\theta_{const} = \theta_{const} + A \cdot \sin(2\pi t/T + \alpha) \quad (12)$$

где θ_{const} – среднее значение температуры за год; A – амплитуда колебаний θ_{const} за год, °С, T – период (365 сут), t – номер дня в году, α – номер дня (начальная фаза) при t_0 .

Данные о температуре на глубинах 1,6 и 3,2 м относятся к стандартным метеорологическим измерениям, и эту информацию можно получить из климатических справочников или данных наблюдений. Результаты применения модели «Гидрограф» в различных физико-географических условиях показали, что данная аппроксимация может быть адекватно использована в безмерзлотных районах [13].

В зоне многолетней мерзлоты температура почвы на глубинах 1,6 и 3,2 м сильно варьируется год от года. В качестве граничного условия могла бы служить температура пород на так называемом уровне нулевых годовых амплитуд, т. е. на глубине, где не сказываются внутригодовые колебания температур, и ее можно принять условно постоянной. Однако данные о температуре почвы на больших глубинах крайне редки и отрывочны, для исследуемой территории они недоступны, поэтому в данной работе было принято допущение о межгодовом постоянстве хода температуры на глубине 3,2 м на территории Колымской станции.

При расчете динамики тепла в зимний период появляется дополнительный расчетный слой с переменными характеристиками – слой снега на поверхности земли. Одновременно с расчетом тепла происходит расчет динамики влаги в почве по слоям, результат которого (содержание воды и/или льда) учитывается в вычислении общей теплопроводности и теплоемкости слоев почвы. При наличии фазовых переходов в зависимости от содержания влаги отдельные слои потребляют или расходуют тепло, сохраняя при этом нулевую температуру.

Для каждого расчетного слоя почвы задается набор параметров, необходимых для расчета динамики тепла в нем. Он включает в себя плотность и пористость почвы, коэффициент теплопроводности, удельную теплоемкость ее твердой фазы. Кроме того, по средним многолетним данным задается температура почвы на глубине 3,2 м.

Материалы

Для оценки параметров физически обоснованной модели требуется информация о физических свойствах компонентов ландшафта, таких как почва и растительность. Для оценки работоспособности модели и адекватности ее алгоритмов описываемым процессам необходимы качественные входные и проверочные данные. Наличие такого рода информации ограничено в зоне многолетней мерзлоты. Колымская водно-балансовая станция является редким исключением. На ней в течение длительного (с 1948 г.) времени ведутся как стандартные гидрометеорологические измерения, так и экспериментальные, включающие в себя наблюдения за формированием

деятельного слоя, снегомерные съемки на разных ландшафтах, испарение с различных подстилающих поверхностей и др. (рис. 1) [10].

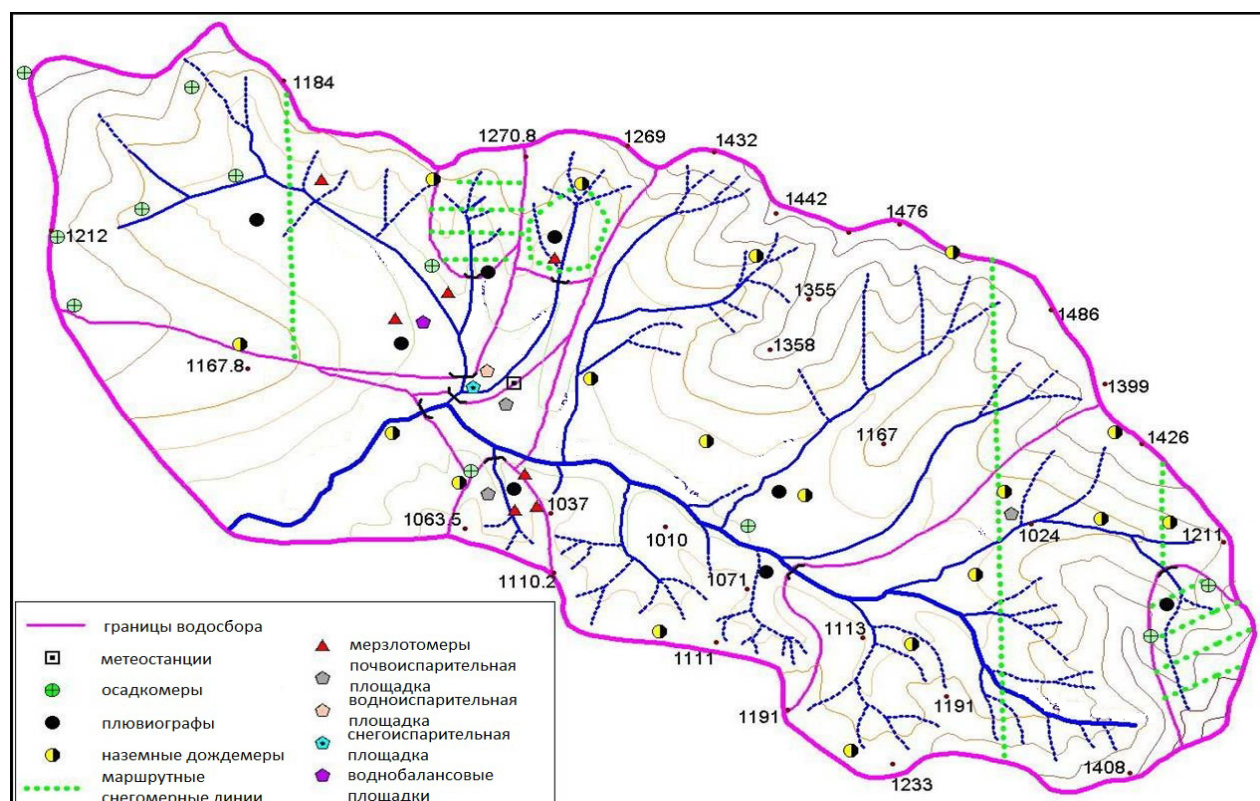


Рис. 1. Схема Колымской водно-балансовой станции

КВБС (61°53' с. ш., 147°43' в. д., Магаданская обл.) располагается в верховьях р. Колыма в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. Рельеф местности горный, высоты от 830 до 1700 м. Среднегодовая температура воздуха $-11,6^{\circ}\text{C}$, годовые суммы осадков варьируют от 250 до 440 мм [17].

Поскольку рельеф исследуемого водосбора горный, характер распределения осадков сложен. Для учета неоднородного распределения осадков по территории станции были проанализированы имеющиеся данные по среднему многолетнему количеству осадков в разных частях водосбора и на основании этого построена карта изогет в программе ArcGIS (рис. 2). Как видно, количество жидких осадков увеличивается с высотой, особенно на склонах южной экспозиции. Распределение твердых осадков подчиняется тем же закономерностям. Выявленные закономерности были учтены при обработке входной информации для моделирования.

На территории КВБС были выделены и нанесены на карту шесть типов ландшафтов: гольцы, тундры, редколесья, кустарники, леса и болота [7]. При этом учитывались такие факторы, как характер рельефа, экспозиция склонов, тип почвы, структура растительного покрова. На основании данной информации и описания, сопровождающего материалы наблюдений станции, были выделены три основных типа подстилающей поверхности Колымской станции (так называемые стокоформирующие комплексы, или СФК) – каменная осыпь, тундровое редколесье и заболоченный лес (рис. 3).

В ходе моделирования принимается допущение о том, что внутри каждого СФК гидрологические процессы проходят единообразно и описываются одним набором параметров почвы и растительности.

Приводораздельные территории и крутые склоны заняты в основном каменной осыпью, где почвенный покров практически отсутствует, а из растительности широко распространены лишь накипные лишайники. В средних частях склонов и в седловинах распространены мохово-лишайниковые лиственничные редколесья и заросли кедрового стланика на щебнистых, криоболотных почвах.

Долины и террасы заняты заболоченным лиственничным лесом и сфагновыми болотами на мерзлотно-таежных почвах. Схематические профили почвы каменной осыпи и заболоченного леса представлены на рис. 4.

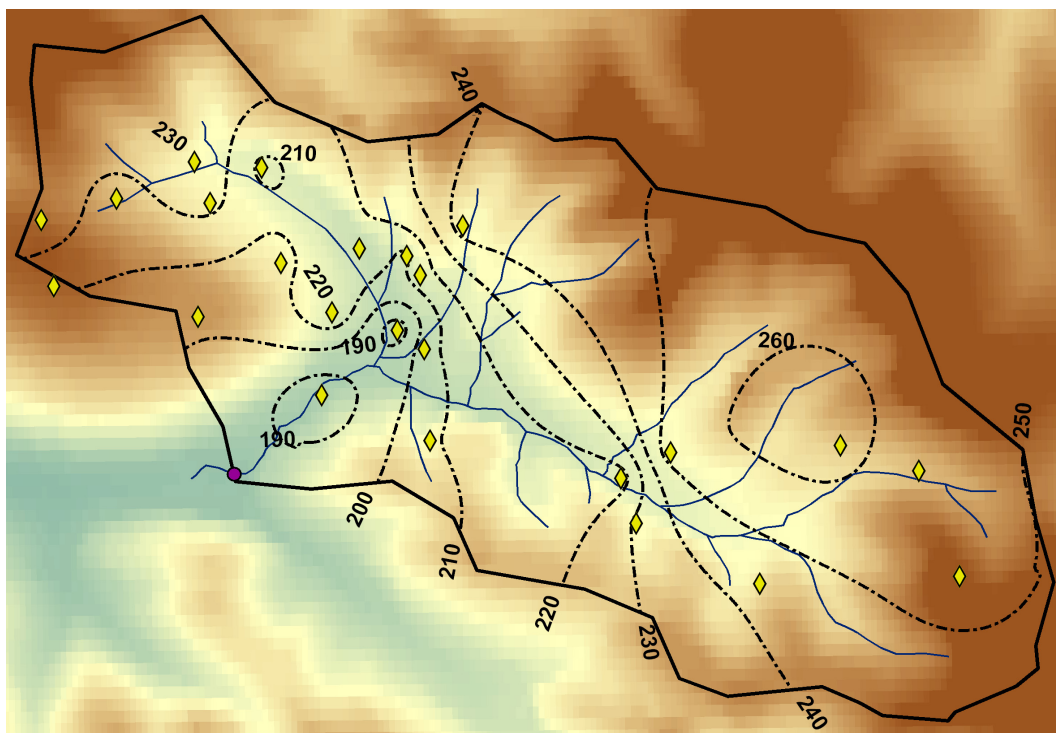


Рис. 2. Схема распределения жидких осадков по территории Колымской станции, мм

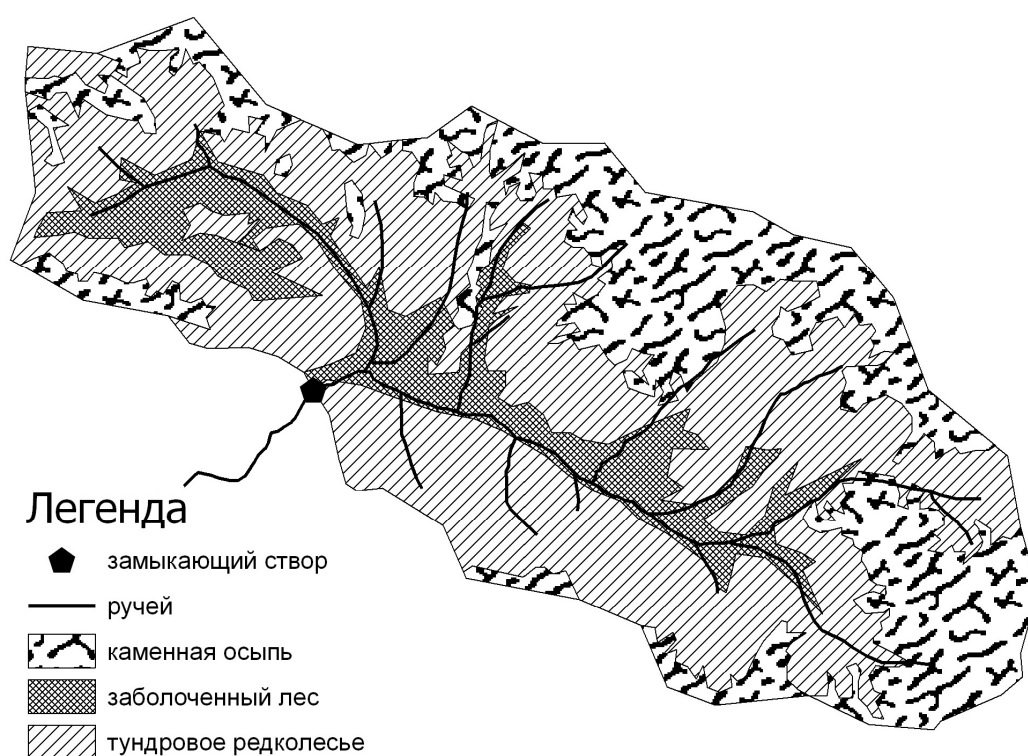


Рис. 3. Распределение стокоформирующих комплексов на территории Колымской водно-балансовой станции

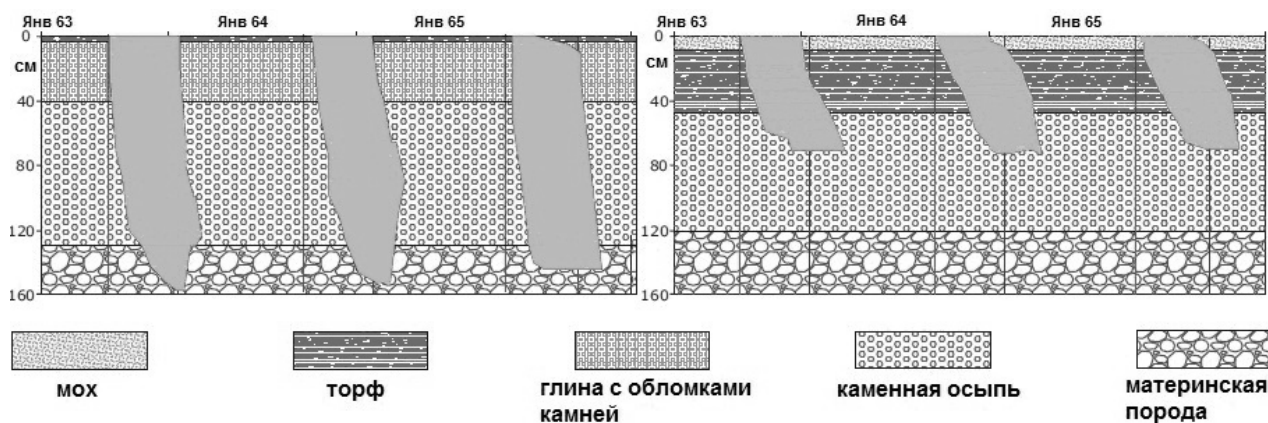


Рис. 4. Почвенный профиль и характерный контур протаивания почвы каменной осыпи (слева) и заболоченного леса (справа)

Результаты

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ПОЧВЫ

Анализ данных наблюдений за процессами протаивания почвы в разных частях водосбора показал, что глубина деятельного слоя обладает высокой пространственной изменчивостью по территории станции. Глубина протаивания почвы определяется в основном типом ландшафта. Максимальная глубина протаивания (до 1,6 м) наблюдается в каменной осыпи при отсутствии растительности, минимальная (0,6 м) – в заболоченном лесу при наличии слоя торфа в почвенном профиле (рис. 4). На рис. 5 представлено сравнение наблюдаемых величин и результатов моделирования протаивания почвы в покрытой мхом каменной осыпи и в заболоченном лиственныйном лесу.

Параметры модели, описывающие почвенный покров, были назначены по литературным данным и исходя из общего описания почвенных профилей, доступных в материалах наблюдений [10]. В ходе моделирования значения параметров подверглись незначительному уточнению. Экспериментальные расчеты протаивания и промерзания почвы показали, что основную роль играют такие параметры, как пористость, теплопроводность и теплоемкость почвенного слоя, а также максимальная водоудерживающая способность, от которой зависит содержание влаги в слое. Максимальная водоудерживающая способность (МВС) меняется в широком диапазоне от 13% в каменной осыпи до 50% в почве заболоченного леса. Теплопроводность принята равной 2,3 и 0,8 Вт/м·°С, теплоемкость – 750 и 1930 Дж/кг·°С соответственно в осыпи и в лесу (табл.).

Значения параметров почвы, использовавшиеся при расчете процессов протаивания – промерзания многолетнемерзлых грунтов

	Пористость, б/р	Удельная теплоемкость, Дж/кг·°С	Удельная теплопроводность, Вт/м·°С	Максимальная водоудерживающая способность, б/р
Мох	0,80	1930	0,5	0,60
Торф	0,80	1930	0,8	0,50
Глина с обломками камней	0,50	750	1,7	0,15
Каменная осыпь	0,55	750	2,3	0,13
Материнская порода	0,50	750	2,3	0,13

Как можно видеть на рис. 5, рассчитанная максимальная глубина протаивания за сезон близка к наблюдаемой для обоих ландшафтов, однако каменная осыпь протаивает значительно быстрее, чем это моделируется. Это может объясняться меньшим по сравнению с рассчитанным содержанием влаги в почве и неточной информацией о почвенном профиле.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОКА ВОДЫ

Расчет гидрографов стока в замыкающем створе ручья Контактного за период 1971–1984 гг. (площадь 22 км²) был произведен с набором параметров, принятым при моделировании глубин протаивания почвы. Сравнение рассчитанных и наблюдаемых суточных величин представлено на рис. 6.

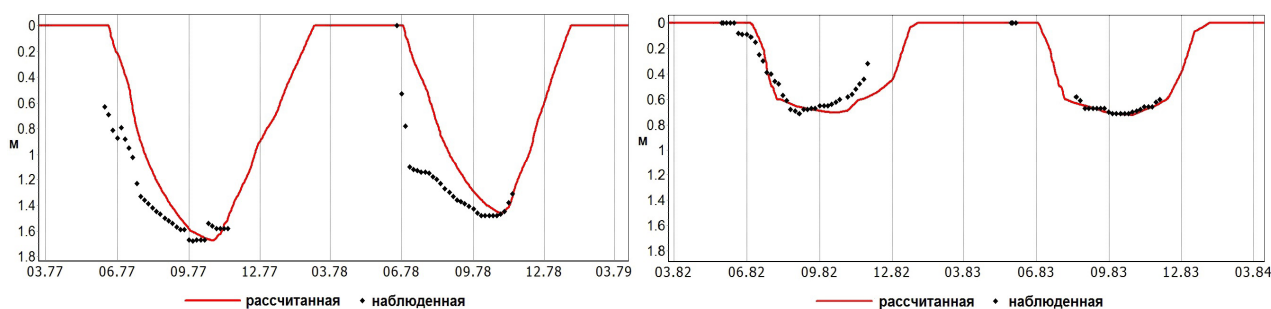


Рис. 5. Рассчитанная и наблюдаемая глубины протаивания почвы в каменной осыпи (слева) и заболоченном лесу (справа). Колымская водно-балансовая станция

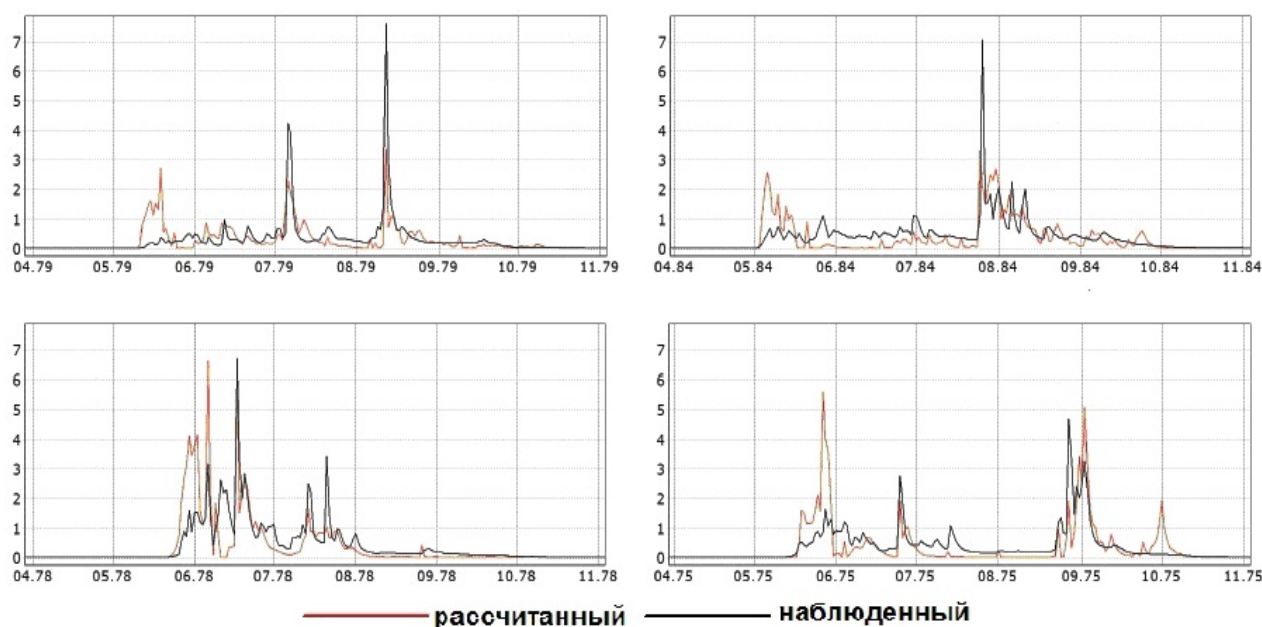


Рис. 6. Рассчитанный и наблюдаемый гидрограф стока ручья Контактного, Колымская водно-балансовая станция, м³/с

Наблюдаемый средний годовой слой стока за период моделирования составил 282 мм, рассчитанный – 239 мм. Средняя ошибка равна 15%. Максимальные отклонения рассчитанного слоя стока за год от измеренного, достигающие 50% (1971 и 1983 гг.), наблюдаются в наиболее сухие годы, поскольку неопределенности в расчете динамики влаги в почве и испарения имеют больший относительный вес именно в засушливые годы. Минимальные отклонения величиной от 6 до 16% (1972, 1975, 1978, 1979, 1981, 1984 гг.) имеют место в средневодные и многоводные годы. В целом модель несколько занижает сток по сравнению с наблюдаемым. Сток выше измеренного рассчитывается только в 1971 и 1977 гг.

Как видно из рис. 6, внутри года максимальные расхождения между рассчитанными и наблюдаемыми значениями наблюдаются в период весеннего снеготаяния. Согласно результатам моделирования, весной водность реки резко увеличивается за счет поверхностного и почвенного стока сразу после таяния основной массы снега, так как впитывание воды в еще мерзлую почву ограничено. В реальности подъем половодья наблюдается гораздо более распластанный и растянутый. Такое расхождение может быть объяснено несколькими причинами. Во-первых, талая вода может впитываться в почву в гораздо более значительных количествах, чем согласно расчету. К сожалению, на станции не велись наблюдения за влажностью почвы, поэтому проверить адекватность моделирования влажности почвы не представилось возможным. Кроме того, территория станции практически повсеместно покрыта мхом, который может впитывать значительное количество воды. Такие свойства растительности напрямую не учитываются в модели.

Заключение

На основе анализа результатов исследования были сделаны основные выводы:

1. Выделенные однородные с точки зрения гидрологических процессов стокоформирующие комплексы последовательно сменяют друг друга от водоразделов к руслу от каменной осыпи, практически лишенной растительного покрова, до заболоченного лиственничного леса.

2. Глубина оттаивания почвы на территории Колымской станции, обладая большой изменчивостью по территории, зависит в основном от типа почвы и растительности. Основные параметры модели, влияющие на расчет протаивания почвы, – это пористость, удельные теплопроводность и теплоемкость и максимальная водоудерживающая способность слоев почвы.

3. Модель формирования стока «Гидрограф» удовлетворительно рассчитывает переменные состояния и сток воды на территории Колымской станции.

4. Необходимо дальнейшее совершенствование алгоритмов расчета фильтрации влаги в мерзлую почву, а также введение в модель прямого учета гидрологически важных свойств напочвенного растительного покрова (мох, опад), таких как его водоудерживающие, испаряющие и теплофизические свойства.

Наблюдения за переменными состояниями на водосборе необходимы для понимания формирования стока в конкретных гидрометеорологических и географических условиях. Только те модели, которые реалистично отображают динамику снежного покрова, влажность и температуру почвы, глубины протаивания и промерзания, могут быть названы действительно физически обоснованными. Параметры физически обоснованной модели, уточненные на длительных рядах данных экспериментальных наблюдений, должны быть в будущем систематизированы и перенесены на другие водосборы в сходных природных условиях.

Работа была выполнена при поддержке Российско-Германской Лаборатории полярных и морских исследований им. Отто Шмидта в рамках гранта OSL-10-23.

Литература

1. Анисимов О. А. Вероятностно-статистическое моделирование мощности сезонно-талого слоя в условиях современного и будущего климата // Криосфера Земли. 2009. Т. 13, вып. 3. С. 36–44.
2. Аржанов М. М., Елисеев А. В., Демченко П. Ф., Мохов И. И. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (не-анализа) // Криосфера Земли. 2007. Т. 11, вып. 4. С. 65–69.
3. Бояринцев Е. Л. Азональные факторы формирования дождевого стока на территории Колымской ВБС // Труды ДВНИГМИ. 1986. Вып. 135. С. 67–94.
4. Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Опыт критического анализа. Л., 1988.
5. Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А. Математическое моделирование в гидрологии. М., 2010.
6. Гусев Е. М., Насонова О. Н., Джоган Л. Я. Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 133–145.
7. Королев Ю. Б. Гидрологическая роль растительности Верхней Колымы // Известия АН СССР. Серия Биологическая. 1982. № 4. С. 517–529.
8. Кучмент Л. С., Гельфан А. Н., Демидов А. И. Модель формирования стока на водосборах зоны многолетней мерзлоты (на примере верхней Колымы) // Водные ресурсы. 2000. Т. 27, № 4. С. 435–444.
9. Малевский-Малевич С. П., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д. и др. Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2007. Т. 9, вып. 1. С. 29–37.
10. Материалы наблюдений Колымской воднобалансовой станции. Вып. 17–27. Магадан, 1975–1985.
11. Georgiyevsky V. Yu., Shiklomanov I. A. Climate change and water resources // World Water Resources at the Beginning of the 21st Century. Cambridge Univ. Press, 2003. P. 390–413.
12. Miller J. R., Russell G. L. The impact of global warming on river runoff // J. Geophys. Res. 1992. 97(D3). P. 2757–2764.
13. Lebedeva L. S., Semenova O. M. Evaluation of climate change impact on soil and snow processes in small watersheds of European part of Russia using various scenarios of climate. Technical Documents in Hydrology (in review).
14. Riseborough D., Shiklomanov N., Etzelmuller B. et al. Recent Advances in Permafrost Modelling // Permafrost and Periglacial processes. 2008. N 1. P. 137–156. DOI: 10.1002/ppp.615.

15. Semenova O. M. Experience with modelling of runoff formation processes at basins of different scales using data of water-balance stations // Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins (Proc. of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March – 2 April, 2009). IAHS publ. 336. 2010. P. 167–172.

16. Vinogradov Y. B., Semenova O. M., Vinogradova T. A. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system // Hydrological Processes. 2010, n/a. doi: 10.1002/hyp.7901.

17. Zhuravin S. A. Features of water balance for small mountainous watersheds in East Siberia: Kolyma Water Balance Station case study // Northern Research Basins Water Balance. IAHS publ. N 290. 2004. P. 28–40.

РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ПРОТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ о. САМОЙЛОВСКОГО (ДЕЛЬТА РЕКИ ЛЕНА)

Н. Н. Огородникова¹, И. В. Федорова²

¹ *Санкт-Петербургский государственный университет*

² *Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт*

В последнее время возрос интерес к процессам, связанным с глобальным изменением климата, что, в свою очередь, делает актуальным изучение гидрологических процессов на территориях распространения многолетнемерзлых пород. Климатические изменения в зоне вечной мерзлоты прежде всего сказываются на изменении глубины протаивания/промерзания.

Интерес к районам, расположенным в зоне распространения многолетней мерзлоты, также связан с хозяйственным освоением данных территорий. Стоит упомянуть, что площадь распространения многолетнемерзлых толщ горных пород в настоящее время составляет 25% всей суши земного шара и более 60% площади России. Однако вследствие малой плотности населения эти районы слабо охвачены гидрометеорологическими наблюдениями.

В данное время на территории России изучение мерзлых пород ведется на 4 опытных станциях: Якутской научно-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР, Северо-Восточной научно-исследовательской мерзлотной станции в г. Магадане, Игарской научно-исследовательской мерзлотной станции и опытной станции «Остров Самойловский» Института Арктики и Антарктики (Санкт-Петербург).

Для изучения глубины протаивания был выбран о. Самойловский (дельта р. Лена). Экспедиционные данные за период с 2003 по 2007 г. были предоставлены участниками Российско-Германского проекта «Лена», проводимого Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом и Германским институтом полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера.

Остров Самойловский (72°22' N, 126°28' E) расположен внутри огромной дельты р. Лена (рис. 1). Он является репрезентативным островом в активной и наиболее молодой части дельты и занимает площадь около 1200 га. Западное побережье острова характеризуется новыми аккумуляционными процессами, связанными с речной седиментацией. На восточной же береговой части острова доминирующими являются эрозионные процессы, которые формируют абразионное побережье. Около 70% поверхности этой части острова занимают отложения голоцена.

Климат южной части дельты Лены вместе с о. Самойловским характеризуется низкой среднегодовой температурой воздуха (–14,7 °C) и низким годовым количеством осадков (190 мм). Зимний сезон длится 9 месяцев, с конца сентября до конца марта ($T_{\text{ср}} = -30$ °C, $T_{\text{мин}} = -48$ °C). Зимний период характеризуется недостаточно высоким снежным покровом и сильными метелями.

Энергия для весенней снежной абляции обеспечивается суммарной радиацией. Более 50% доступной энергии теряется на сублимацию в результате действия сильного ветра.

Летний период длится 12 недель и отличается относительно высокими температурами ($T_{\text{ср}} = 7$ °C, $T_{\text{макс}} = 18$ °C) и постоянным освещением (так называемый полярный день).

Почвы характеризуются однородностью распространения. Для торфяных почв понижений типично положение грунтовых вод на уровне почвенной поверхности и преимущественно анаэробное аккумулятивное органического вещества. Исследование сухих почв показало низкое положение грунтовых вод, ниже которых происходит накопление органического вещества. Глубина протаива-