

Сезонные закономерности распределения осадков на территории Западного Саяна и их учет при моделировании стока

Г. В. Пряхина, Е. С. Зелепукина, Т. Н. Осипова, С. А. Гаврилкина,
В. А. Соловьев, Т. А. Виноградова

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199043, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Пряхина, Г. В., Зелепукина, Е. С., Осипова, Т. Н., Гаврилкина, С. А., Соловьев В. А., Виноградова, Т. А. (2019). Сезонные закономерности распределения осадков на территории Западного Саяна и их учет при моделировании стока. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (3), 466–476. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.306>

На основе анализа метеоданных с суточным разрешением за период с 1970 по 1985 г. установлено, что на территории Западного Саяна, слабо обеспеченной данными режимных гидрометеорологических наблюдений, более тесные связи наблюдаются для годовых сумм осадков, а менее тесные — для сезонных сумм. Получены зависимости изменения осадков теплого и холодного периодов для семигумидных и семиаридных районов исследуемой территории. Установлено, что на южном семиаридном макросклоне наибольшую величину достоверности имеет линейная корреляция: вне зависимости от высотного интервала величина плювиометрического градиента остается постоянной. Для северного семигумидного макросклона изменения сумм осадков с высотой определяются логарифмической зависимостью: для низкогогорья (до 500 м) характерно быстрое нарастание количества осадков (градиент теплого периода достигает 100 мм / 100 м), а выше 1300 м градиенты и теплого и холодного периодов практически не превышают 2 мм / 100 м. Достоверность выявленных зависимостей была подтверждена модельными расчетами. Объекты и периоды моделирования выбирались с учетом наличия как метеорологических, так и гидрологических данных (водосборные бассейны рек Амыл и Ус для семигумидного и семиаридного районов соответственно). Было установлено, что применение сезонных плювиометрических градиентов заметно улучшает сходимость рассчитанных и наблюдаемых суточных гидрографов при математическом моделировании стока. Показано, что для семиаридных районов учет пространственного распределения осадков оказался более значимым. Введение высотных градиентов наиболее существенно улучшает сходимость результатов моделирования в годы с наименьшими значениями критерия Нэша — Сатклифа и снижает количество лет с неудовлетворительным качеством расчетов, что особенно важно при моделировании стока в условиях недостаточности гидрологической информации.

Ключевые слова: пространственная интерполяция осадков, вертикальные плювиометрические градиенты, моделирование стока.

Введение

Горные районы характеризуются большей по сравнению с равнинными территориями интенсивностью протекания гидрологических, геоморфологических и других процессов. Широкий диапазон высот, значительные уклоны, различная

экспозиция склонов, формы и ориентация речных долин, а также сложная ландшафтная структура приводят к значительной пространственной неоднородности в распределении метеорологических элементов, что, в свою очередь, определяет особенности режима стока с горных водосборов.

Несмотря на многочисленные исследования по выявлению закономерностей распределения осадков с высотой, проводимые для различных горных стран, при решении разнообразных практических задач проблема определения региональных значений плювиометрических градиентов остается весьма актуальной. Это связано в первую очередь с низкой плотностью существующей сети метеостанций и постов, невысокой репрезентативностью данных из-за расположения станций преимущественно в долинах и наличия пропусков в рядах наблюдений, а также с определяющим влиянием гипсометрического и орографического факторов на пространственную изменчивость поля осадков и пр. Значения плювиометрических градиентов зависят не только от высоты, но и от сезона, вида осадков, экспозиции склонов, длины ряда наблюдений и временных интервалов, по которым определяется градиент (Marchand, 1986; Smadja, 1991; Martínez del Castillo et al., 2012; Sanchez Martín, 1995).

В качестве объекта исследования был выбран среднегорный хребет субширотного простираия Западный Саян, расположенный между более высокими поднятиями Горного Алтая и Восточного Саяна. Несмотря на сравнительно малую высоту и отсутствие развитого гляциально-нивального пояса, хребет представляет собой важный ороклиматический барьер: наветренные северные и северо-западные склоны характеризуются относительно высокой для континентального сектора влагообеспеченностью, а подветренные южные и юго-восточные — недостаточной.

Выявление высотных зависимостей распределения осадков в Саянах затруднено по причине отсутствия инструментальных наблюдений в верхних частях горных хребтов в отличие от территории Алтая, значительно лучше обеспеченной метеорологическими данными, в том числе и в высокогорье. В этой ситуации можно ориентироваться лишь на имеющиеся данные снегомерных съемок (Геткер и Жданов, 1992) и ряд работ по расчету значений весенних осадков с суточным разрешением (Бураков и Гордеев, 2013). В связи с тем, что при моделировании гидрографов стока необходимы зависимости, учитывающие пространственное изменение осадков во все периоды года, целью настоящего исследования стало выявление региональных зависимостей распределения осадков по высоте на территории среднегорий Западного Саяна для различных сезонов. Проверка корректности полученных закономерностей была выполнена путем расчета суточных гидрографов стока.

1. Материалы и методы

Методика выявления региональных особенностей изменения осадков с высотой, представленная в работе, основана на корреляционном анализе сетевых данных о количестве осадков с суточным и месячным разрешением за 1970–1985 гг. по 18 метеостанциям и постам, расположенным на высотах примерно от 200 до 1400 м (рис. 1). Выбор указанного временного интервала обусловлен отсутствием пропусков в рядах данных на максимальном количестве имеющихся в регионе станций

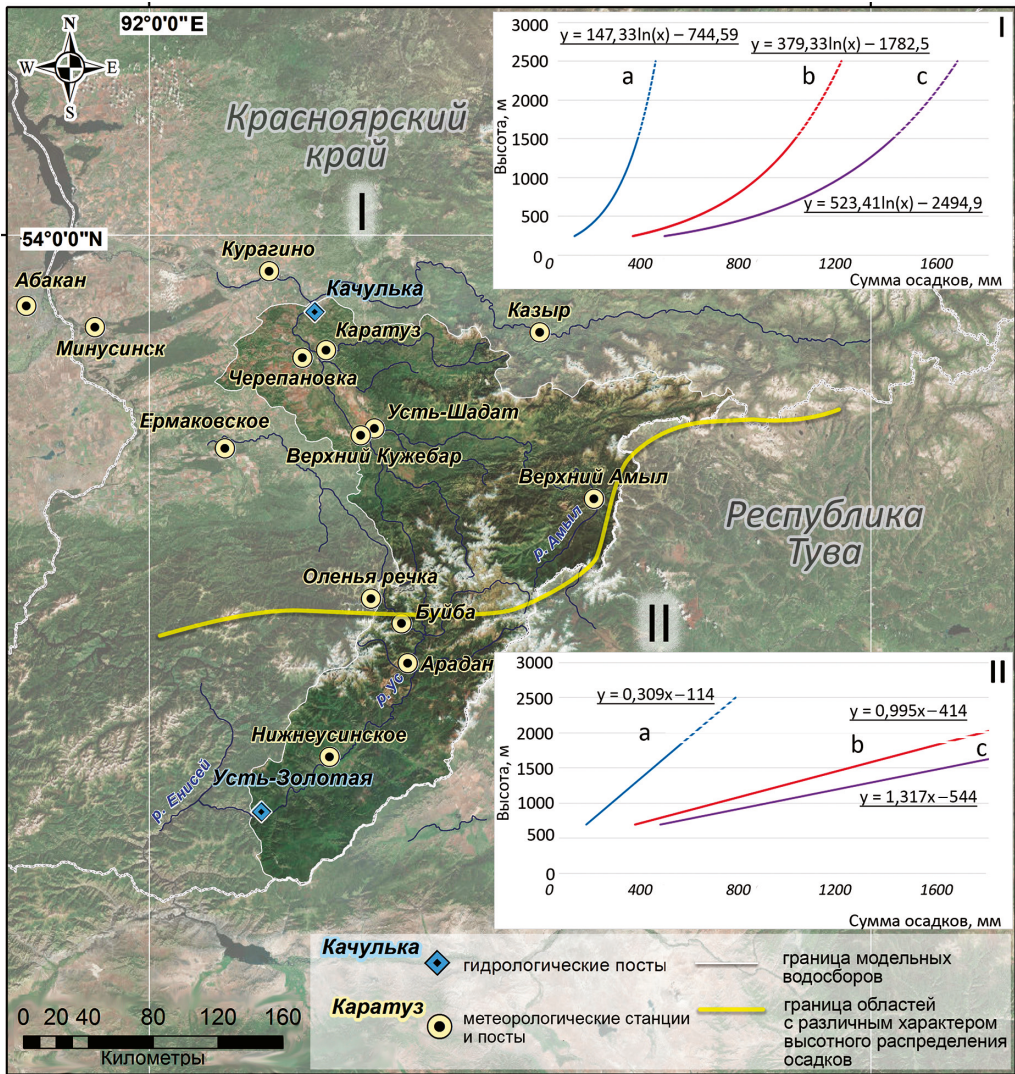


Рис. 1. Расположение гидрологических и метеорологических станций в районе исследования. Зависимости изменения осадков от высоты: I — для I группы метеостанций, II — для II группы; а — холодный период, б — теплый период, с — год

и постов; кроме того, период 1961–2013 гг. не отличается значимым трендом в межгодовом ходе осадков в Алтае-Саянском регионе (Чередыко, 2015).

Для выделения групп станций с более тесными корреляционными связями был применен кластерный анализ. В качестве правила объединения использовалась одиночная связь, в качестве меры расстояния — величина $d = 1 - r$, где r — коэффициент линейной корреляции между суммами осадков на станциях. Поскольку предварительный анализ распределения осадков с высотой на изучаемой территории выявил различия для холодного и теплого периодов (Пряхина и др., 2017), все расчеты проводились отдельно для сумм осадков за теплый (апрель–октябрь), холодный (ноябрь–март) периоды и за год. Из-за пропусков в рядах данных на стан-

циях Нижне-Усинское, Буйба и Арадан расчеты производились по данным шести лет наблюдений.

Для каждого года определялись уравнения аппроксимирующих кривых изменения количества осадков с высотой, по которым вначале было рассчитано количество осадков для стометровых высотных интервалов, а затем — отношения сумм осадков на определенной высоте к сумме осадков на станциях (M_i). Уравнения аппроксимирующих кривых изменения M_i с высотой характеризуют зависимости распределения осадков в различные периоды года.

Проверка адекватности предложенного подхода к интерполяции осадков осуществлялась путем сравнения наблюдаемых и смоделированных гидрографов стока. Для этого использовалась моделирующая система с распределенными параметрами «Гидрограф», разработанная Ю.Б.Виноградовым (Виноградов и Виноградова, 2010) и показавшая свое успешное применение в различных физико-географических условиях¹ (Vinogradov et al., 2011).

Моделирование проводилось для двух случаев:

1. Без учета вертикальных градиентов. При этом для интерполяции суточных осадков по площади водосбора использовался метод линейной триангуляции, при котором для каждой расчетной точки (РТ) гексагональной сетки, равномерно покрывающей площадь бассейна, использовались данные трех ближайших метеостанций, причем вес каждой метеостанции учитывался пропорционально расстоянию до РТ.
2. С учетом вертикальных градиентов. В этом случае для расчета сумм суточных осадков в РТ количество наблюдаемых осадков на метеостанции умножалось на соответствующий поправочный коэффициент:

$$K = W_i (aH_n - b), \quad (1)$$

где a , b — коэффициенты уравнений, аппроксимирующих кривых изменения M_i с высотой; n — номер РТ; H_n — высота расчетной точки, м; W_i — весовой коэффициент метеостанции, определяемый по уравнению:

$$W_i = D_{i,n} / \sum_1^m D_{i,n}, \quad (2)$$

где i — порядковый номер метеостанции; $D_{i,n}$ — расстояние между соответствующей метеостанцией и РТ, м; m — число метеостанций в группе.

В качестве критерия сравнения был взят критерий эффективности Нэша — Сатклифа (NS), используемый Американской ассоциацией гражданских инженеров, а также Всемирной метеорологической организацией (Shamseldin and O'Connor, 2001).

¹ Hydrograph Model Website. URL: <http://www.hydrograph-model.com> (дата обращения: 10.09.2018).

2. Результаты и обсуждение

В ходе корреляционного анализа выявлено, что на исследуемой территории более тесные связи наблюдаются для годовых сумм осадков, менее тесные — для сумм за теплый период: статистически значимые коэффициенты корреляции изменяются от 0,95 до 0,60, соответственно. Более высокие корреляционные связи между годовыми осадками по сравнению с сезонными подтверждают известный факт, что с увеличением периода осреднения корреляция возрастает (Каган, 1979). Уменьшение корреляционных связей с увеличением расстояния между станциями особенно заметно в теплый период, когда возрастает вероятность образования локальных облачных систем и осадки носят очаговый характер.

С помощью кластерного анализа в северо-восточном предгорье Западного Саяна была выделена группа станций с наиболее близкими связями: Минусинск, Курагино, Ермаковское, Каратуз, Казыр. С этой группой были агрегированы станции Верхний Амыл и Оленья речка, так как для них максимальные значения d в теплый период не превышают 0,20. Вторая группа объединяет станции, расположенные южнее главного водораздела Западного Саяна в диапазоне высот от 660 м до 1404 м: Нижне-Усинское, Арадан, Буйба, Оленья речка. Данные некоторых станций (Абакан, Верхний Кужебар, Черепановка, Усть-Шадат и др.) не использовались в расчетах в связи со статистически незначимыми связями рядов осадков с данными остальных станций. Таким образом, группу I составили станции, отражающие закономерности распределения осадков семигумидной области Западного Саяна, группу II — семиаридной (см. рис. 1). Отметим, что граница, разделяющая области с разными зависимостями распределения осадков, не совпадает с осевой частью хребта, а смещена в подветренную сторону вследствие перераспределения твердых атмосферных осадков за счет метелевого переноса (Ревякин, 1981).

Результаты расчетов показали, что во все годы и для всех периодов для первой группы станций бóльшую величину достоверности аппроксимации имеют уравнения, представляющие логарифмическую зависимость (коэффициент детерминации изменяется от 0,94 до 0,97), а для второй — линейную (коэффициент детерминации изменяется от 0,93 до 0,99) (Zelepukina et al., 2017), что соотносится с зависимостями, используемыми в прогнозах стока (Балабанова и Заборцева, 1984).

Для семигумидной области быстрое увеличение градиента осадков прослеживается до 500 м (см. рис. 1, I): градиент теплого периода в предгорьях составляет более 100 мм / 100 м, холодного — около 40 мм / 100 м; более плавное нарастание наблюдается примерно до 1300 м, а выше — градиенты и теплого и холодного периодов составляют в среднем всего 2 мм / 100 м. Подобная закономерность распределения летних осадков на Алтае (в долине р. Актру) наблюдается до высоты 2500 м, после чего скорости увеличения количества осадков резко снижаются вплоть до достижения нулевой границы градиента (Галахов и др., 1987). Учитывая, что в Саянах выше 1400 м данные режимных наблюдений отсутствуют, полагаем, что полученные зависимости можно обоснованно использовать только до уровня верхней границы леса, поскольку по данным снегомерных съемок (Авдеева и Бураков, 2003) выше 1650 м в подгольцовом поясе имеет место резкое уменьшение снеготолщин вследствие усиленного переветывания и выдувания снега.

В семиаридных частях хребта (см. рис. 1, II) полученные градиенты теплого периода составляют около 100 мм / 100 м, а холодного — 30 мм / 100 м. Выявленную линейную зависимость можно использовать примерно до верхней границы леса, которая на южном склоне прослеживается до уровня 1800–1850 м (Gavrilkina and Zelerukina, 2017); выше — в подгольцовом поясе — скорее всего, происходит снижение значения градиента аналогично отмеченному на северном семигумидном макросклоне.

Следует добавить, что максимальная величина отклонения рассчитанных значений сумм осадков от наблюдаемых составила для некоторых станций для теплого периода 14 %, а для холодного — 25 %. Это может быть связано с неодновременностью выпадения осадков в предгорной и горной частях водосбора, что часто приводит к завышению рассчитанных с помощью плювиометрических градиентов сумм осадков в горах при интенсивных ливнях на равнине в период прохождения атмосферных фронтов (Гордеев, 2012). Значительные различия градиентов жидких и твердых атмосферных осадков в сочетании с пространственно-временной дискретностью выпадения осадков в разных частях водосбора определяют целесообразность использования при моделировании стока именно сезонных зависимостей вместо осредненных годовых.

Проверка корректности выявленных зависимостей распределения осадков осуществлялась путем моделирования стока двух рек, относящихся к бассейну Енисея. Периоды моделирования выбирались с учетом наличия как метеорологических, так и гидрологических данных. Для расчета суточных сумм осадков в бассейнах р. Амыл (приток р. Туба) и р. Ус использовались зависимости осадков с высотой для I и II групп станций соответственно.

Модельные расчеты показали, что применение сезонных зависимостей распределения осадков по высоте в целом привело к заметному улучшению сходимости рассчитанных и наблюдаемых гидрографов. Для р. Амыл (с. Качулька) значение показателя NS в среднем за расчетный период возросло на 10 % (см. табл.). Заметное улучшение произошло в год с наихудшим критерием качества (1984 г.): NS увеличился с 0,44 до 0,65 (рис. 2).

Значительное улучшение сходимости (в среднем на 67 %) для р. Ус (пост Усть-Золотая) отмечено для 10 из 11 промоделированных лет, в том числе для года с наихудшим критерием качества (1980 г.): NS увеличился с 0,15 на 0,75. Имевшее место ухудшение сходимости в отдельные годы (снижение NS) даже при введении градиента, по нашему мнению, может быть связано с невозможностью учета сильных дождевых паводков в условиях низкой обеспеченности непрерывными рядами метеоданных.

Следует добавить, что полученные закономерности распределения осадков отражают в первую очередь влияние гипсометрического фактора. Количественно учесть влияние орографического строения территории в настоящее время не представляется возможным. Разная ориентация склонов по отношению к преобладающему переносу воздушных масс приводит к существенным различиям реальных сумм осадков на наветренных и подветренных склонах. Однако в целом повышение точности пространственной интерполяции осадков за счет использования сезонных плювиометрических градиентов, полученных для данного региона, приводит к значительно более надежным результатам моделирования. При этом

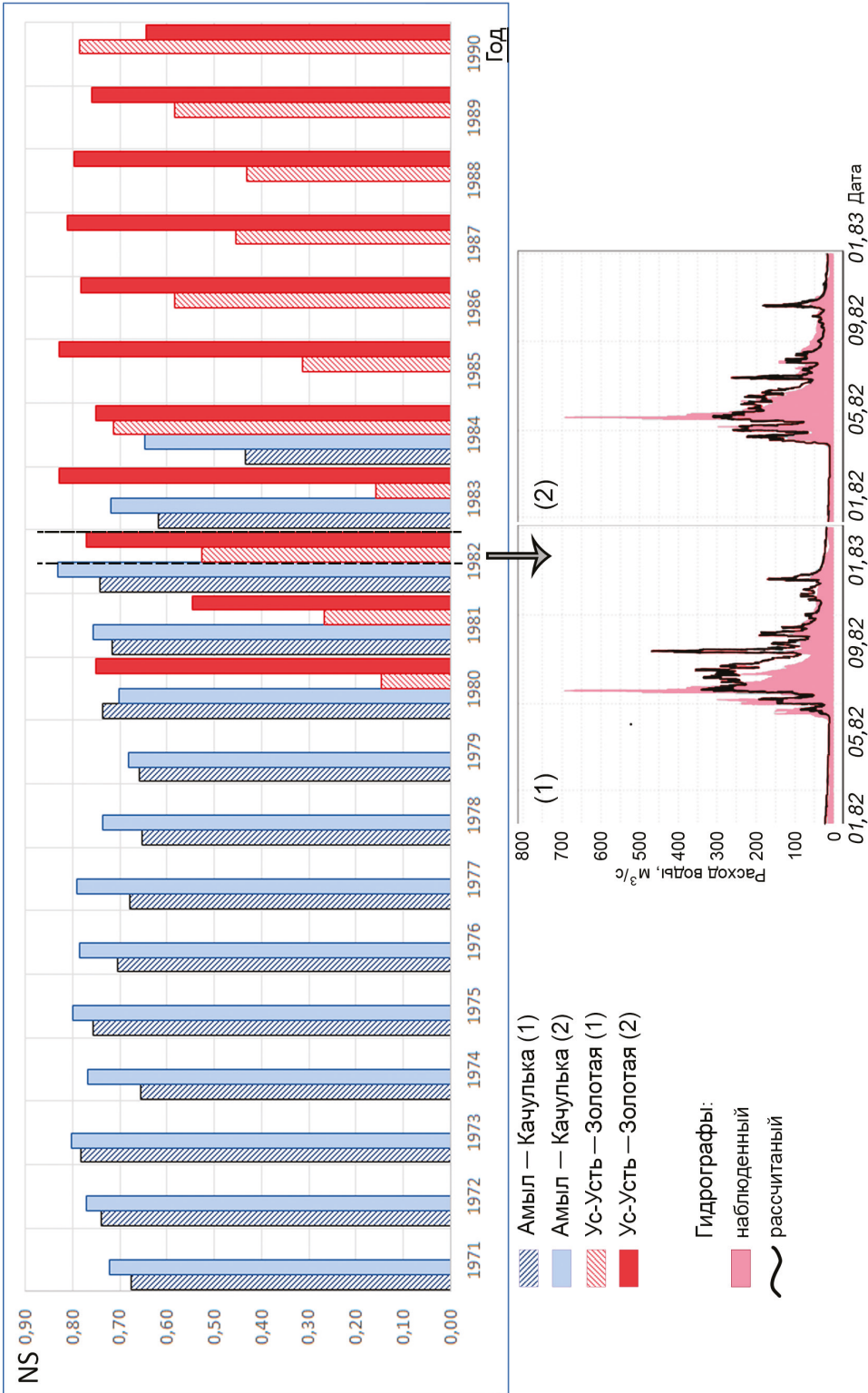


Рис. 2. Значения критерия Нэша — Сагклифа (NS) для моделирования по водосборам р. Амыл и Ус без учета (1) и с учетом (2) пльвиометрических градиентов на примере сравнения наблюдаемого и рассчитанного гидрографов р. Ус, пост. Усть-Золотая (1982 г.)

**Основные характеристики моделируемых водосборов
и некоторые результаты моделирования стока***

Параметр	Водосбор (река — пост)	
	Амыл — Качулька	Ус — Усть-Золотая
Площадь водосбора, км ²	9850	6110
Средняя высота водосбора, м	797	1323
Период моделирования, годы	1971–1984	1980–1990
Число лет моделирования	14	11
Критерий NS за период моделирования:		
средний	0,75/0,68	0,75/0,45
максимальный	0,83/0,78	0,83/0,78
минимальный	0,65/0,44	0,55/0,15
Среднегодовой слой стока, мм:		
рассчитанный	655/460	320/376
наблюденный	668	328

*В числителе — с учетом, в знаменателе — без учета градиентов.

наиболее значимый результат был получен для семиаридных территорий: в отдельные годы произошло более чем двукратное улучшение коэффициента сходимости NS.

Заключение

Выявление региональной специфики сезонного распределения осадков для территорий, слабо освещенных метеорологическими данными, имеет важное прикладное и теоретическое значение как для прогнозирования стока с использованием стандартных методик, так и при использовании математических моделей формирования стока. Достоверность полученных в работе зависимостей изменения с высотой осадков теплого и холодного периодов для макросклонов Западного Саяна подтверждена модельными экспериментами. Введение высотных градиентов особенно существенно улучшает сходимость результатов моделирования в годы с наименьшими значениями критерия Нэша — Сатклифа, снижая, таким образом, количество лет с неудовлетворительным качеством расчетов. Это особенно важно при моделировании стока в условиях недостаточности гидрологической информации, например в случае закрытия или отсутствия гидрологических постов.

Литература

Авдеева, Ю.В., Бураков, Д.А., 2003. Особенности формирования водного режима р. Оленьей речки и их учет при разработке математической модели стока, в: Проблемы геологии и географии Сибири. Материалы научной конференции, посвященной 125-летию основания Томского государственного университета и 70-летию образования геолого-географического факультета. Изд-во Томского ун-та, Томск, 120–122.

- Балабанова, О.А., Заборцева, Л.И., 1984. Рекомендации по прогнозированию паводочного стока на неизученных и слабо изученных реках Восточной Сибири. Сиб. НИИ гидротехники и мелиорации, Красноярск.
- Бураков, Д.А., Гордеев, И.Н., 2013. Оценка предвесенних снегозапасов в бассейнах Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ. География и природные ресурсы 1, 72–78.
- Виноградов, Ю.Б., Виноградова, Т.А., 2010. Математическое моделирование в гидрологии. Академия, Москва.
- Галахов, В.П., Нарожный, Ю.К., Никитин, С.А., Окишев, П.А., Севастьянов, В.В., Севастьянова, Л.М., Шантыкова, Л.Н., Шуруп, В.И., 1987. Ледники Актру (Алтай). Гидрометеиздат. Ленинград.
- Геткер, М.И., Жданов, А.А., 1992. Закономерности распределения высоты и плотности снежного покрова в горно-таежных районах Саян. Труды САНИГМИ 146 (227), 56–63.
- Гордеев, И.Н., 2012. Расчет весенних осадков в горной части бассейна р. Енисей. Вестник Красноярского гос. аграрного ун-та 3 (66), 106–109.
- Каган, Р.Л., 1979. Осреднение метеорологических полей. Гидрометеиздат, Ленинград.
- Пряхина, Г.В., Зелепукина, Е.С., Журавлев, С.А., Осипова, Т.Н., Амбурцева, Н.И., Виноградова, Т.А., 2017. Оценка стока с малых горных водосборов методами гидрологического моделирования. Вестник Московского ун-та. Серия 1: География 5, 29–37.
- Ревякин, В.С., 1981. Природные льды Алтае-Саянской горной области (внутриконтинентальный вариант гляциосферы Земли). Гидрометеиздат, Ленинград.
- Чередыко, Н.Н., Журавлев, Г.Г., 2015. Крупномасштабные режимы изменения климата и согласованность изменений пространственно-временной структуры поля атмосферных осадков в алтайском регионе. Вестник Томского гос. ун-та 391, 220–226.
- Gavrilkina, S., Zelepukina, E., 2017. Dynamics of mountain forest ecosystems in the continental sector of Siberia: patterns and reasons. In: 17th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017. Conference proceedings 17 — Water resources. Forest, marine and ocean ecosystems, 797–804.
- Marchand, J.P., 1986. Les gradients pluviométriques moyens annuels, dans les montagnes du Kerry. Revue de géographie alpine 74 (1–2), 43–53.
- Martínez del Castillo, E., Serrano-Notivolí, R., Novak, K., Longares Aladrén, L.A., Arrechea, E., Arrillaga, L., Saz Sánchez, M.A., 2012. Cuantificación de los gradientes climáticos altitudinales en la vertiente norte del macizo del Moncayo a partir de una nueva red de estaciones automáticas en altura. Cambio climático. Extremos e impactos. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC). Salamanca Serie A 8, 519–528.
- Sanchez Martin, J.M., 1995. Propuesta Metodologica para la obtencion gradientes termohidricos anuales. Lurralde: inv. espac. 18, 137–154.
- Shamseldin, A.Y., O'Connor, K.M., 2001. A Non-Linear Neural Network Technique for Updating of River Flow Forecasts. Hydrology and Earth System Sciences 5 (4), 577–597.
- Smadja, J., 1991. Particularités climatiques d'un grand versant de mousson himalayen. Revue de géographie alpine 2, 99–119.
- Vinogradov, Yu. B., Semenova, O.M., Vinogradova, T.A., 2011. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. Hydrological processes 25 (7), 1055–1073.
- Zelepukina, E., Pryakhina, G., Shastina, G., Amburtceva, N., Gavrilkina, S., 2017. Estimation of small mountain drainage basin runoff based on runoff formation model (West Sayan case study). In: 17th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017. Conference proceedings 17 — Water resources, forest, marine and ocean ecosystems, 245–252.

Статья поступила в редакцию 13 октября 2018 г.

Статья рекомендована в печать 3 июня 2019 г.

Контактная информация:

Пряхина Галина Валентиновна — g.pryahina@spbu.ru

Зелепукина Елена Сергеевна — e.zelepukina@spbu.ru

Осипова Татьяна Николаевна — t.osipova@spbu.ru

Гаврилкина Светлана Андреевна — s.gavrilkina@spbu.ru

Соловьев Виталий Александрович — hydrovitosik@mail.ru

Виноградова Татьяна Александровна — t.vinogradova@spbu.ru

Seasonal distribution patterns of precipitation on the territory of West Sayan Ridge and their consideration in runoff modeling

G. V. Pryakhina, E. S. Zelepukina, T. N. Osipova,
S. A. Gavrilkina, V. A. Solovyev, T. A. Vinogradova

St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Pryakhina, G. V., Zelepukina, E. S., Osipova, T. N., Gavrilkina, S. A., Solovyev, V. A., Vinogradova, T. A. (2019). Seasonal distribution patterns of precipitation on the territory of West Sayan Ridge and their consideration in runoff modeling. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (3), 466–476. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.306> (In Russian)

Specific height dependences of the precipitation based on the daily meteorological data analysis (for the period 1970–1985) were obtained for Western Sayan, which is under conditions of insufficient data provided by the scarce network of stations. Analysis revealed that the annual precipitation sum is characterized by closer dependence than seasonal precipitation. It has been generally observed that the linear correlation has the highest reliability for the southern macroslope of the ridge. At the same time the dependence of the northern slope is primarily determined by height: distribution of precipitation is defined by logarithmic function. Thus, the low mountain pluviometric gradient (below 500 m) is characterized by a quick increase in precipitation (in the warm period the gradient reaches a value of 100 mm/100 m). As for the mid-mountain parts (above 1300 m), gradients of warm and cold periods do not exceed 2 mm/100 m. Reliability of identified dependences has been confirmed by model calculations. All the modelled objects and periods were selected considering the existence and availability of both hydrological and meteorological data — the river Us and Amyl basins (right tributaries of Yenisei, Krasnoyarsk district, Russia) which represent typical runoff conditions for the semi-arid and semi-humid areas of the Western Sayan. The investigation also found that the application of seasonal pluviometric gradients during runoff modeling has improved the convergence of calculated and obtained hydrographs. It was shown that taking into account vertical pluviometric gradients turned out to be more significant for semi-arid regions. And furthermore, it has improved the quality of runoff modeling notably for periods characterized by the least value of Nash-Sutcliffe criteria, and reduced the amount of years with improper quality of calculation. This is especially important under conditions of insufficient hydrometeorological data.

Keywords: spatial interpolation of the values of meteorological elements, pluviometric gradients, runoff modeling.

References

- Avdeeva, Y.V., Burakov, D.A., 2003. Factors in the creation of a Deer river water regime and taking it into account during the mathematical runoff modeling. In: *Materialy nauchnoi konferentsii Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, Publishing house of Tomsk University, Tomsk, 120–122. (In Russian)
- Balabanova, O.A., Zabortseva, L.I., 1984. The recommendations on forecasting of high water runoff at poorly researched rivers of East Siberia. *Sib. NII gidrotekhniki i melioratsii*, Krasnoyarsk. (In Russian)
- Burakov, D.A., Gordeev, I.N., 2013. An assessment of a spring snowstock in Krasnoyarsk and Sayan-Shushensk reservoir basins. *Geografiya i prirodnye resursy* 1, 72–78. (In Russian)
- Cheredko, N.N., Zhuravlev, G.G., 2015. Large-scale modes of climate change and the consistency of changes in the spatio-temporal structure of the field of atmospheric precipitation in the Altai region. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* 391, 220–226. (In Russian)
- Galakhov, V.P., Narozhnyi, Iu. K., Nikitin, S.A., Okishev, P.A., Sevast'yanov, V.V., Sevast'yanova, L.M., Shantykova, L.N., Shurov, V.I., 1987. The Glaciers of Aktru. *Gidrometeoizdat*, Leningrad. (In Russian)

- Gavrilkina, S., Zelepukina, E.*, 2017. Dynamics of mountain forest ecosystems in the continental sector of Siberia: patterns and reasons. In: 17th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017. Conference proceedings 17 — Water resources. Forest, marine and ocean ecosystems 32, 797–804.
- Getker, M. I., Zhdanov, A. A.*, 1992. Distribution patterns of snow capacity and density in Sayan taiga belts. *Trudy SANIGMI* 146 (227), 56–63. (In Russian)
- Gordeev, I. N.*, 2012. Spring rainfall calculation in the Yenisei river basin mountainous part. *Vestnik Krasnoarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* 3 (66). 106–109. (In Russian)
- Kagan, R. L.*, 1979. An averaging of meteorological fields. *Gidrometeoizdat, Leningrad*. (In Russian)
- Manuel Sanchez Martin, J.*, 1995. Propuesta Metodologica para la obtencion gradientes termohidricos anuales. *Lurralde: inv. espac.* 18, 137–154.
- Marchand, J. P.*, 1986. Les gradients pluviometriques moyens annuels, dans les montagnes du Kerry. *Revue de géographie alpine* 74 (1–2), 43–53.
- Martínez del Castillo, E., Serrano-Notivolí, R., Novak, K., Longares Aladrén, L. A., Arrechea, E., Arrillaga, L., Sáiz Sánchez, M. A.*, 2012. Cuantificación de los gradientes climáticos altitudinales en la vertiente norte del macizo del Moncayo a partir de una nueva red de estaciones automáticas en altura. *Cambio climático. Extremos e impactos. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC)*. Salamanca Serie A 8, 519–528.
- Pryakhina, G. V., Zelepukina, E. S., Zhuravlev, S. A., Osipova, T. N., Amburtceva, N. I., Vinogradova, T. A.*, 2017. Estimation of runoff from the small mountain drainage basins using methods of hydrological modeling. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Geography* 5, 29–37. (In Russian)
- Revyakin, V. S.*, 1981. The glaciation of Altay-Sayan mountain region. *Gidrometeoizdat, Leningrad*. (In Russian)
- Shamseldin, A. Y., O'Connor, K. M.*, 2001. A Non-Linear Neural Network Technique for Updating of River Flow Forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences* 5 (4), 577–597.
- Smadja, J.*, 1991. Particularités climatiques d'un grand versant de mousson himalayen. *Revue de géographie alpine* 2, 99–119.
- Vinogradov, Yu. B., Semenova, O. M., Vinogradova, T. A.*, 2011. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. *Hydrological processes* 25 (7), 1055–1073.
- Vinogradov, Yu. B., Vinogradova, T. A.*, 2010. Mathematic modeling in hydrology. *Akademiia Publ., Moscow*. (In Russian)
- Zelepukina, E., Pryakhina, G., Shastina, G., Amburtceva, N., Gavrilkina, S.*, 2017. Estimation of small mountain drainage basin runoff based on runoff formation model (West Sayan case study). In: 17th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017. Conference proceedings 17 — Water resources, forest, marine and ocean ecosystems 31, 245–252.

Received: October 13, 2018

Accepted: June 3, 2019

Contact information:

Galina V. Pryakhina — g.pryakhina@spbu.ru

Elena S. Zelepukina — e.zelepukina@spbu.ru

Tatiana N. Osipova — t.osipova@spbu.ru

Svetlana A. Gavrilkina — s.gavrilkina@spbu.ru

Vitaly A. Solovyev — hydrovitosik@mail.ru

Tatiana A. Vinogradova — t.vinogradova@spbu.ru