

Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура

© 2021 С. Ю. Лунаков

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

**E-mail: rbir@mail.ru*

Резюме. Учитывая неустойчивый режим увлажнения и многообразие ландшафтов в пределах бассейна р. Амур, проблема оценки влияния климатических изменений на процессы приземного влагооборота в регионе становится многоаспектной, связанной с решением частных задач. В работе на основе коэффициента эластичности исследовалась реакция речного стока на изменения количества атмосферных осадков. Объектом настоящего исследования являются малые и средние речные бассейны (всего 52), относящиеся к системе Среднего и Нижнего Амура. Использовались данные стандартных наблюдений на гидрологических постах и метеорологических пунктах за летне-осенний паводкоопасный период (июнь–сентябрь). Ряды данных отбирались таким образом, чтобы они включали различные условия увлажнения. Выяснено, что при увеличении количества осадков на 1 % сток рек в паводкоопасный сезон в 48 случаях увеличивался на 1.02–3.86 %, в 4 случаях уменьшался. Результаты работы принципиально близки к региональным оценкам в бассейне р. Амур на основе анализа фактического материала (в том числе в ближайшем зарубежье) и результатам моделирования, а также к значениям коэффициента эластичности стока, полученным в различных географических зонах и приведенным в профильной литературе. Исследована связь значений коэффициента эластичности стока с различными бассейновыми показателями. Для рек, расположенных в Приморском крае (водосбор р. Уссури), выявлена связь значений коэффициента эластичности с сезонными суммами слоев стока и осадков, коэффициентом стока, средней высотой, уклонами водосборов и средними уклонами речной сети. Обсуждается влияние локальных условий формирования стока на отклик речных бассейнов при изменении количества атмосферных осадков.

Ключевые слова: коэффициент эластичности, осадки, сток, изменения климата, река Амур

Estimation of the runoff elasticity of the rivers in the eastern part of the Amur River basin

Sergey Yu. Lunakov

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

**E-mail: rbir@mail.ru*

Abstract. Taking into account the unstable moisture regime and the diversity of landscapes within the Amur River basin, the problem of assessing the impact of climatic changes on the processes of surface water cycle in the region becomes multifaceted, associated with the solution of particular problems. This work studied the reaction of a river runoff to changes in the amount of atmospheric precipitation on the basis of the elasticity coefficient. Small and medium-sized river basins (52 in total) belonging to the system of the Middle and Lower Amur are the objects of this study. The data of standard observations at hydrological posts and meteorological points for the summer-autumn flood hazard period (June-September) were used. The data series were selected to include different moisture conditions. It was found that with an increase in precipitation by 1 %, the river runoff in the flood hazard season has increased by 1.02–3.86 % in 48 cases, and decreased in 4 cases. The results of the work are fundamentally close to the regional estimates within the basin of the Amur River on the base of the analysis of factual material (including the near abroad) and simulation results, as well as to the values of the runoff elasticity coefficient obtained in different geographic zones and given in the specialized literature. The relationship between the elasticity

coefficient values of runoff with various basin indicators has been studied. For the rivers in the Primorsky Krai (catchment area of the Ussuri River), the relationship between the elasticity coefficient values and the seasonal runoff and precipitation, the runoff coefficient, average height, catchments slopes and average river network slopes has been revealed. The influence of local conditions of runoff formation on the river basins response to changes in the amount of atmospheric precipitation is discussed.

Keywords: elasticity coefficient, precipitation, streamflow, climate changes, Amur river

Для цитирования: Лупаков С.Ю. Оценка эластичности стока рек восточной части бассейна Амура. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 179–188. <https://doi.org/10.30730/grtz.2021.5.2.179-188>

For citation: Lupakov S.Yu. Estimation of the runoff elasticity of the rivers in the eastern part of the Amur River basin. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 179–188. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/grtz.2021.5.2.179-188>

Введение

Изучение влияния долгосрочных изменений климата на речной сток является одной из актуальных задач современных наук о Земле [IPCC, 2013]. Это связано с возрастающей потребностью в водных ресурсах для нужд экономики и коммунального снабжения, а также с необходимостью обеспечения безопасности населения и объектов техносферы, находящихся в непосредственной близости к водным объектам и в частности рекам.

Наиболее обсуждаемым проявлением климатических изменений является повышение приземных температур [IPCC, 2013]. Известно, что темпы потепления на северо-востоке Азии превышают общемировые. По некоторым оценкам [Новороцкий, 2007; Мещенина и др., 2007], в бассейне р. Амур за прошедшее столетие температура воздуха увеличилась на 1.3 °С. Средняя скорость потепления оценена на уровне 0.25 °С/10 лет [Новороцкий, 2011], в отдельных частях бассейна достигает 0.37 °С/10 лет [Новороцкий, 2013]. Совместно с температурным режимом претерпевают изменения и процессы приземного влагооборота, с чем, например, связывают последовательность гидрологических событий редкой повторяемости в бассейне р. Амур за последние 20–30 лет [Гарцман, Лупаков, 2017].

Река Амур является одной из крупнейших в Азии с площадью водосбора около 2 млн км² [Гарцман, Галанин, 2011]. Бассейн Амура находится на границе системы «суша–океан», в пределах четырех государств – России, КНР, Монголии и КНДР. Орография региона достаточно сложная, что связано с разнообразием и разновозрастностью геологических структур. Рельеф стокоформирующих областей бассейна в целом горный. Климат территории можно рассматривать как континентальный с муссонными проявлениями. Большую

часть питания реки бассейна Амура получают от летне-осенних дождей. Весеннее половодье обычно слабо выражено и растянуто во времени. Основная фаза гидрологического режима – летние паводки.

Оценка изменений водного режима под влиянием климатических изменений зачастую выполняется с помощью применения гидрологических моделей, на вход которых подаются последовательности метеорологических характеристик, трансформированные относительно исторических значений в соответствии с определенным сценарием изменения климата [Krysanova, Hattermann, 2017]. Для бассейна р. Амур известно относительно немного работ подобной тематики [Хон, Мохов, 2012; Гельфан и др., 2018], в которых результаты получены для замыкающих створов крупных рек. В контексте обсуждаемого вопроса малые речные водосборы в бассейне р. Амур также недостаточно исследованы. Другой подход заключается в анализе данных исторических наблюдений на основе так называемого коэффициента эластичности [Sankarasubramanian et al., 2001; Chiew, 2006]. Этот метод довольно широко распространен благодаря достаточности небольшого количества входной информации, обычно массово доступной (ряды данных по речному стоку, атмосферным осадкам, температуре воздуха). В применении к бассейну Амура описываемый подход был реализован для небольшого количества объектов в Приморском крае [Гарцман, Лупаков, 2019].

Важным выводом, полученным в работах с применением коэффициента эластичности, является непропорциональный отклик речного стока на изменение количества осадков. Например, увеличение осадков на 1 % вызывает увеличения стока в среднем на 2–3 % в Австралии [Chiew, 2006], до 2.5 % в разных регионах США [Sankarasubramanian et al., 2001], до 3 %

в целом по всему миру [Chiew et al., 2006]. Следовательно, при увеличении количества осадков на 10–20 % в рамках климатических изменений можно ожидать роста характеристик стока на 20–60 % и более, что представляет значимую величину, особенно в условиях экстремальных дождевых паводков.

Настоящую работу можно рассматривать как попытку расширения географии речных бассейнов, в которых проведена оценка влияния изменения количества осадков на речной сток на основе непараметрического коэффициента эластичности. Акцент сделан на относительно небольших и средних по площади водосборах в бассейне р. Амур: с его российской стороны проанализировано 52 объекта.

Основной задачей являлось подтвердить факты непропорционального отклика речного стока на изменение количества атмосферных осадков, полученные ранее, в том числе с использованием гидрологических моделей и данных глобальных климатических моделей. Альтернативный подход в целом подтвердил полученные выводы: в подавляющем большинстве проанализированных объектов увеличение осадков летне-осеннего сезона на 1 % привело к росту суммарного слоя стока за тот же период на 1.02–3.86 %. Дополнительно была проведена корреляция значений коэффициента эластичности с некоторыми бассейновыми характеристиками. Связи были найдены только для замыкающего створа у пос. Кировский на р. Уссури, и только для бассейновых характеристик стока, средних высот, а также средних уклонов водосборов и речной сети.

Материалы и методы

В пределах бассейна Амура были выбраны водосборы (см. таблицу в конце статьи), для которых имелись данные стандартных гидрометеорологических наблюдений за стоком длительностью минимум 30 лет за период с июня по сентябрь. Также ключевое условие к рядам расходов было наличие 2013 года, как отражающего экстремальные условия стокоформирования практически на всех исследуемых объектах. К рядам атмосферных осадков предъявлялись те же требования, что и к гидрологической информации. Каждому водосбору соответствовал один или несколько метеопунктов, расположенных в его пределах или непосредственной близости. Сезонной суммой осадков на каждый год для отдельно-

го водосбора считалось среднее арифметическое из данных метеопунктов, приуроченных к каждому водосбору.

Учитывая наличие данных, сложности с их репрезентативным пространственным осреднением, а также невысокую плотность наблюдательной сети, было решено ограничиться площадью водосборов 30 000 км². Суммарно в работе использованы данные с 52 гидрологических постов и 86 метеопунктов (см. таблицу в конце статьи). Наибольшее количество исследуемых объектов находится в Приморском крае, около двух десятков – в Хабаровском крае, Амурской области и Еврейской автономной области в сумме. Водосборы Забайкалья и с китайской стороны Амура не рассматривались.

Длительность рядов данных заметно варьирует. В среднем, по стоку начало данных приходится на 1940–1960-е годы, конец – на 2018 г. Длина ряда осадков, как правило, несколько больше.

Для оценки влияния изменений стока при соответствующем изменении осадков применялся непараметрический критерий [Sankarasubramanian et al., 2001] в виде

$$e = \text{median} \left(\frac{Q_i - \bar{Q}}{P_i - \bar{P}} \times \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right), \quad (1)$$

где \bar{Q} и \bar{P} – среднееголетний слой стока и осадков соответственно за июнь–сентябрь, Q_i и P_i – слой стока и осадков за i -й сезон. Для исследуемых объектов \bar{Q} составляет от 60 до 340 мм, \bar{P} от 330 до 780 мм (см. таблицу), коэффициент стока варьирует от 0.15 до 0.70.

В целом, уравнение (1) отражает чувствительность гидрологических систем к долгосрочным колебаниям климата. В данном случае оно показывает, насколько в процентах изменится сезонный сток при увеличении количества осадков на 1 %.

К преимуществам методики стоит отнести достаточность относительно небольшого набора данных; отсутствие необходимости применять гидрологические модели для оценки возможных изменений стока; устойчивость результатов для объектов по всему миру [Sankarasubramanian, Vogel, 2003; Chiew, 2006]; отражение интегрального поведения основных элементов водного баланса. К недостаткам относится невысокое временное разрешение, обычное для оценок на основе измеренных данных (среднегодовых или,

как в настоящей работе, среднесезонных); учет только наблюдаемых ситуаций, что ограничивает выполнимость экстраполяции результата расчетов; невозможность рассмотрения изменения частоты и распределения атмосферных осадков; отсутствие учета трансформации подстилающей поверхности водосборов и других влияющих на сток характеристик, например температуры воздуха и связанного с ним испарения. Последним можно пренебречь, поскольку во время паводков роль испарения заметно снижается [Гарцман, 2008], а также по причине общей обратной связи между количеством осадков и температурой [Chiew et al., 2013], из чего следует, что в регионах с достаточным увлажнением прямое влияние осадков гораздо весомее, чем остаточное влияние температуры и связанных с ней процессов на речной сток.

Определение морфометрических характеристик водосборов и построение карт проводилось с применением стандартных средств ГИС-обработки в ArcMap версии 10.4. ЦМР-покрытие территории было создано с использованием данных Shuttle Radar Topography Mission (SRTM – <http://srtm.csi.cgiar.org/>). Описание методики и характеристика данных приведена в [Гарцман, 2014].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлено распределение значений коэффициента эластичности стока e (1) по территории бассейна р. Амур за паводкоопасный период (июнь–сентябрь). Их размах достаточно велик: от 0.35 до 3.86 (см. таблицу). Разделим полученные значения на три условные группы эластичности стока: «отрицательная» ($e < 1.00$), «умеренно положительная» ($1.01 \leq e \leq 2.00$) и «существенно положительная» ($e \geq 2.01$). Тогда в них попадет 4, 31 и 17 водосборов соответственно.

Более высокие оценки e сосредоточены на реках Приморского и Хабаровского краев, левобережье Амура характеризуется относительно меньшими значениями. «Отрицательная» эластичность наблюдается на трех реках, относящихся к Среднему Амуру – Беряя (0.66), Малая Пера (0.35), Тюкан (0.82), и на одной в нижнем течении – Кичмари (0.91).

Полученные оценки в целом соответствуют приведенным в литературе. К примеру, в [Chiew, 2006] коэффициент эластичности стока составляет в среднем 2.5–3.0 по отношению к 219 водосборам в Австралии, 1.5–2.5 для 1553 водосборов в США [Sankarasubramanian, Vogel, 2003], 0.4–3.1 для 521 водосбора по всему миру [Chiew et al., 2006], 1.6–3.9 для 89 водосборов Китая [Yang H., Yang D., 2011], около 2.0 для бассейна Сунгари (правобережный приток Амура) [Zhou et al., 2015], 1.1–1.8 в речных бассейнах Южной Кореи, расположенных в непосредственной близости от бассейна Амура [Kim et al., 2013]. Расчеты с помощью математических моделей климата и формирования стока показали¹, что на соседнем водосборе р. Селенга увеличение осадков на 10 % в среднем приводит к росту стока на 20 % ($e \approx 2.0$).

Для бассейна Амура известно относительно небольшое количество работ схожей тематики. В [Гельфан и др., 2018] на основе гидрологического моделирования и данных климатических моделей сделан вывод, что в XXI в. рост стока может превысить рост осадков в два раза, т.е. $e \approx 2.0$. В бассейне р. Уссури – створ у пос. Кировский, на основе данных до 2013 г., e принимает значения 1.2–3.3 [Гарцман, Лупаков, 2019]. В настоящей работе ряд данных на 5 лет больше, включены значимые паводки в 2016 и 2018 гг. Однако значения коэффициента эластичности практически не изменились, что указывает на относительную стабильность оценок. На основе данных глобальных климатических моделей на XXI век оценки роста суммарного слоя стока за июнь–сентябрь по отношению к росту осадков составили 132–153 %, т.е. коэффициент эластичности принимает значения в пределах 1.3–1.5 по бассейну р. Уссури – пос. Кировский [Гарцман, Лупаков, 2019].

Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют также о непропорциональном отклике стока рек бассейна Амура на увеличение осадков. Этот эффект описан в литературе [Гарцман, 2008], и обычно его связывают с уменьшением разнообразных потерь (на заполнение бессточных понижений, снижение эффекта перехвата осадков кронами

¹Миллионщикова Т.Д. 2019. Моделирование и предвычисление многолетних изменений стока р. Селенги: дис. ... канд. геогр. наук. Москва, Институт водных проблем РАН, 133 с.

Millionshikova T.D. 2019. Simulation and precomputation of long-term changes in the Selenga River runoff: Cand. diss. in geographic sciences. Moscow, Water Problems Institute of the RAS, 133 p.

деревьев, суммарное испарение и т.п.) при валовом росте количества осадков. Положительные значения коэффициента эластичности практически по всем исследуемым объектам заметно отличаются от 1 (за исключением двух рек Хабаровского края – Манома и Беренджа), что подчеркивает нелинейный характер местных процессов стокоформирования.

Отрицательная эластичность объясняется в первую очередь учетом в уравнении (1) только осадков, в то время как параллельные изменения остальных факторов в отдельных случаях могут быть более значимыми. По-видимому, с этим связаны две наименьшие оценки коэффициента эластичности стока – рек Беря (0.66) и Малая Пера (0.35). Учитывая самые низкие оценки слоя стока, а также значимую разгрузку подземных вод [Мордовин, 1996], можно предположить, что в этих бассейнах большую часть гидрографа в теплый период составляют грунтовые воды, на которые выпадающие дожди оказывают влияние с большой задержкой, что, в свою очередь, скажется на стоке в замыкающем створе гораздо позже. Альтернативным объяснением может служить существенная доля снегового питания, что, как показано в [Barrera et al., 2020], также снижает эластичность стока. В обоих случаях параллельный рост температур (испарение) оказывает более значимое влияние на водный баланс водосборов.

Исследование связи значений коэффициента эластичности и таких бассейновых характеристик, как среднееголетние значения стока и осадков, коэффициент стока, морфометрические и ландшафтные параметры, выявило некоторые интересные моменты. Если анализировать все объекты совместно, теснота связи на основе $R^2 \approx 0$ во всех случаях. В первую очередь это объясняется различиями в характере увлажнения на достаточно большой территории, что совпадает с результатами анализа глобального масштаба [Chiew et al., 2006], где общая форма обсуждаемых зависимостей достаточно сильно размыта.

В таком случае уместно разделить выборку исследуемых водосборов. Относительно тесные связи значений e с характеристиками речных бассейнов были найдены только в пределах р. Усури с замыкающим створом у пос. Кировский (юго-восток бассейна Амура, Приморский край). Эта территория характеризуется постепенной сменой ландшафтных условий от верховьев к более равнинным территориям, примыкающим к замыкающему створу, т.е. охватывает различные условия стокоформирования при относительно небольшой разнице в климатических характеристиках. Кроме того, наблюдательная сеть в рассматриваемом районе наиболее плотная (рис. 1).

Максимальная теснота связи наблюдается при сравнении значений коэффициента эластичности со среднееголетним значением слоя и коэффициента стока, средней высотой водосборов, средними уклонами водосборов и речной сети (рис. 2). R^2 связей находится в диапазоне от 0.52 до 0.72, коэффициенты корреляции статистически значимы ($p = 0.01$). Сходный результат получен применительно к данным по Болгарии [Seymenov, 2020] и частично по Южной Корее [Kim et al., 2013].

Анализируемые характеристики, очевидно, взаимосвязаны, что выражается в схожести

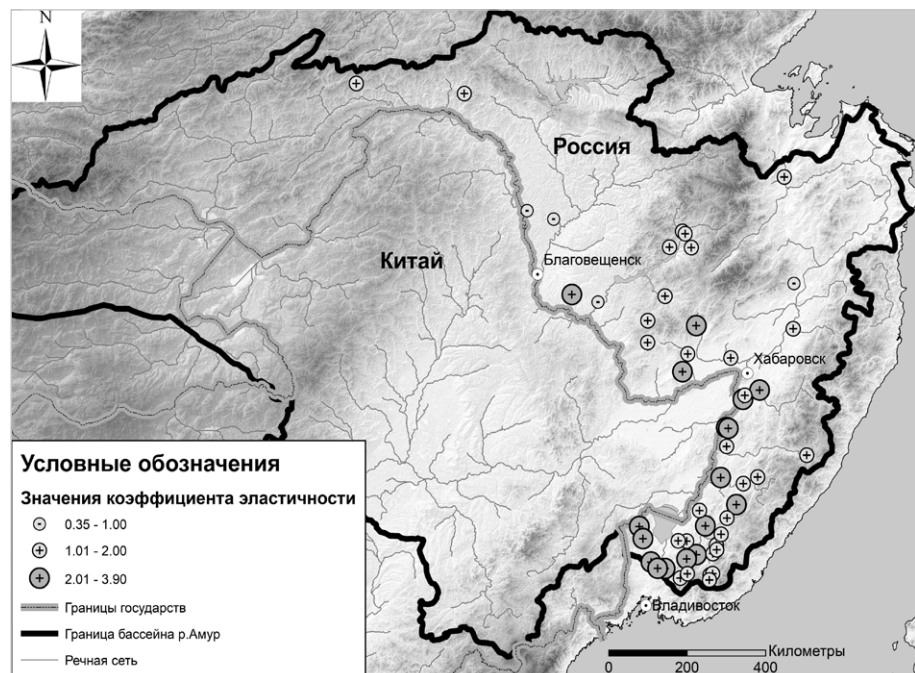


Рис. 1. Пространственное распределение оценок эластичности стока на исследуемой территории.

Figure 1. Spatial distribution of the estimates of runoff elasticity in the studied territory.

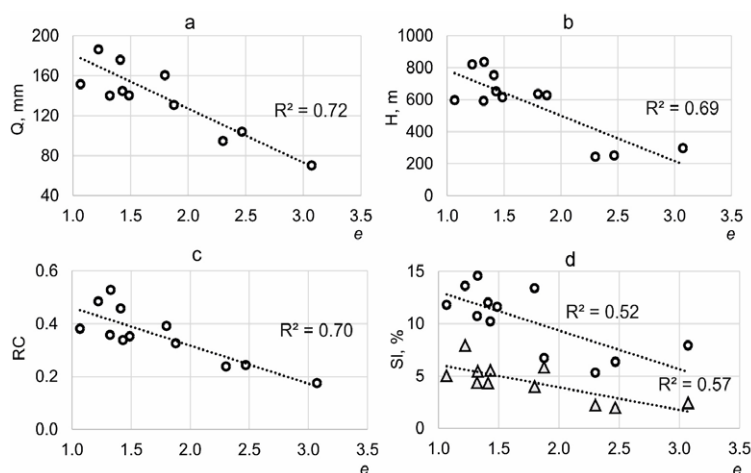


Рис. 2. Связи для бассейна р. Уссури – пос. Кировский значений коэффициента эластичности стока e и среднееголетних значений слоя стока Q за июнь–сентябрь (а), средней высоты водосборов H (б), среднееголетнего коэффициента стока RC за июнь–сентябрь (с), средних уклонов SI водосборов (точки) и речной сети (треугольники) – (д).

Figure 2. Correlation for the Ussuri River basin – Kirovsky settlement between the values of the runoff elasticity coefficient e and long-term average annual values of the runoff layer Q for June–September (a), catchments elevation H (b), long-term average annual runoff coefficient RC for June–September (c), average catchments slopes SI (dots) and river network (triangles) – (d).

поля точек на графиках (рис. 2). В данном случае, чем ниже высотные отметки и уклоны водосборов, тем выше потери стока (ниже коэффициент стока) и меньше его суммарный сезонный слой. Локальная специфика подстилающей поверхности играет важную роль в плане связи отклика речных бассейнов на изменение количества осадков. Водосборы с большими высотными отметками (группа точек с диапазоном коэффициента эластичности от 1.0 до 1.8 на рис. 2) сложены сильно проницаемыми породами, на которых развиты относительно маломощные почвы, характеризующиеся быстрым водообменом и обеспечивающие быструю инфильтрацию влаги в нижние слои [Бугаец и др., 2015]. Это затрудняет образование поверхностного стока, формирующего наиболее мощные паводки и значимую долю сезонного стока. Наоборот, для выложенных водосборов с тяжелым механическим составом почв характерно более быстрое переувлажнение верхнего горизонта при том же количестве атмосферных осадков. На основании этого можно заключить, что фиксированное увеличение объема выпадающих дождей (в %) вызывает разную реакцию речных бассейнов, в том числе в плане скорости формирования поверхностного стока.

Выводы

На основе коэффициента эластичности в пределах бассейна р. Амур проведена оценка изменения стока при соответствующем изменении в количестве атмосферных осадков за летне-осенний паводкоопасный период. Значения коэффициента эластичности, полученные на основе анализа данных

наблюдений, достаточно широко варьируют (0.35–3.86), однако в подавляющем количестве случаев (48 из 52) выше 1, что соответствует диапазону значений, приводимых в профильной литературе для объектов, расположенных в разных физико-географических условиях. Пространственная генерализация полученных оценок затруднена в силу низкой плотности наблюдательной сети в отдельных районах бассейна р. Амур. Однако общая тенденция прослеживается в виде непропорционального отклика сезонного слоя стока на рост количества осадков. При увеличении объемов дождей на 1 % объемы сезонного стока увеличиваются на 1.02–3.86 %. Этот вывод подтверждается независимыми расчетами с применением математических моделей формирования стока и данных современных глобальных климатических моделей и актуальных проекций климата. Таким образом, полученные оценки свидетельствуют о возможном увеличении паводковой опасности в регионе в будущем. Даже относительно небольшой рост количества осадков в рамках климатических изменений может привести к более существенному отклику речных систем на входное воздействие.

Связи значений коэффициента эластичности стока и некоторых бассейновых характеристик были найдены только в бассейне р. Уссури – пос. Кировский (Приморский край). Среди них: коэффициент стока, средняя высота, уклоны водосборов и средние уклоны речной сети, что связано с особенностями подстилающей поверхности водосборов и характером формирования стока.

Приложение

Appendix

Таблица. Анализируемые объекты и их некоторые характеристики

Table. Analyzed objects and some of their characteristics

№	Река – Пост	Метеопункты	<i>S</i>	<i>Q</i>	<i>P</i>	<i>e</i>
1	Амазар – г. Могоча	Ерофей Павлович, Могоча	1020	155	331	1.85
2	Большой Невер – г. Сквородино	Сквородино, Джалинда	563	108	342	1.73
3	Берея – с. Саскаль	Саскаль, Шимановская	1940	61	372	0.66
4	Малая Пера – с. Сукромли	Шимановск, Свободный, Саскаль, Мазаново	913	60	390	0.35
5	Завитая – с. Михайловка	Завитая, Братолобовка	2290	78	423	2.23
6	Буряя – с. Усть-Ниман	Софийский прииск, Усть-Ниман, Усть-Умальта	26500	336	502	1.02
7	Ниман – в 12км от устья	Софийский прииск, Чегдомын	14500	334	493	1.07
8	Чегдомын – пос. Чегдомын	Чегдомын, Усть-Умальта	910	333	497	1.34
9	Тырма – у ж.-д. моста	Сутур, Верховье Урми	6550	238	508	1.15
10	Яурин – пос. Таланджа	Биракан, Таланжа	3130	203	485	1.02
11	Туюн – в 9.0 км ниже устья Талибджан	Чекунда	2990	312	477	1.07
12	Тюкан – клх «Герой Труда»	Малиновка, Завитая	495	116	434	0.82
13	Малая Бира – с. Алексеевка	Бира, Ленинское	1120	136	497	2.59
14	Кульдур – ст. Известковая	Облущье, Биракан	1080	339	512	1.58
15	Икура – г. Биробиджан	Бира, Биробиджан	155	216	560	1.27
16	Беренджа – метеост. Урми	Урми, Верховье Урми	1050	332	814	2.12
17	Тунгуска – с. Архангеловка	Смидович, Верховье Урми	29400	277	725	1.68
18	Илистая – с. Ивановка	Ивановка, Виноградовка	901	73	385	2.36
19	Абрамовка – с. Абрамовка	Абрамовка, Халкидон, Полтавка, Пограничный	839	79	395	2.74
20	Осиновка – с. Осиновка	Осиновка, Ивановка, Приморская	289	58	389	2.03
21	Комиссаровка – пос. Дворянка	Дворянка, Ильинка, Пограничный	1170	105	394	2.65
22	Молоканка – с. Жариково	Жариково, Хороль, Ильинка, Астраханка	390	127	368	2.51
23	Уссури – с. Верхняя Бреевка	Ясное, Верхняя Бреевка	1840	176	385	1.41
24	Извилинка – пос. Извилинка	Ясное, Верхняя Бреевка, Извилинка	1160	202	382	1.33
25	Арсеньевка – пос. Виноградовка	Виноградовка, Воробей, Шкотово	940	144	428	1.43
26	Муравейка – пос. Гродеково	Гродеково, Анучино, Виноградовка, Верхняя Бреевка	761	140	392	1.32
27	Правая Поперечка – пос. Архиповка	Архиповка, Ясное, Верхняя Бреевка	223	186	385	1.22
28	Спасовка – г. Спасск-Дальний	Спасск-Дальний, Свягино, Арсеньев	325	80	456	1.17
29	Одарка – с. Нововладимировка	Спасск-Дальний, Яковлевка	91	103	490	1.48
30	Каменка – с. Каменка	Каменка, Чугуевка	138	160	410	1.80
31	Павловка – с. Уборка	Антоновка, Кавалерово	3360	151	397	1.07
32	Тихая – с. Чернышевка	Анучино, Чернышевка, Варфоломеевка	580	94	398	2.30
33	Варфоломеевка – с. Варфоломеевка	Варфоломеевка, Гродеково	256	70	401	3.07
34	Крыловка – с. Крыловка	Самарка (Журавлевка), Ариадное	1070	104	426	2.47
35	Откосная – с. Самарка	Самарка (Журавлевка), Кокшаровка, Ариадное	1030	106	409	1.14
36	Уссури – с. Кокшаровка	Каменка, Павловка, Извилинка, Верхняя Бреевка, Чугуевка	9340	140	399	1.49
37	Уссури – пос. Кировский	Ясное, Гродеково, Анучино, Виноградовка, Варфоломеевка, Самарка (Журавлевка), Ариадное, Каменка, Антоновка, Кавалерово, Извилинка, Чугуевка, Яковлевка, Кировский	24400	131	402	1.88
38	Малиновка – с. Ариадное	Ариадное, Самарка (Журавлевка)	1180	148	426	1.70
39	Ореховка – пос. Поляны	Поляны, Ариадное, Малиново, Мельничное	508	213	430	2.49

№	Река – Пост	Метеопункты	<i>S</i>	<i>Q</i>	<i>P</i>	<i>e</i>
40	Маревка – пос. Покровка	Рошино, Глубинное, Красный Яр	1910	170	523	3.86
41	Большая Уссурка – с. Рошино	Мельничное, Глубинное, Рошино, Молодежное, Восток, Ариадное, Красный Яр	18700	222	483	1.47
42	Дальняя – с. Глубинное	Глубинное, Родниковая, Красный Яр, Молодежное	2740	308	514	1.13
43	Светловодная – пос. Охотничий	Охотничий, Золотой, Сосуново, Терней	2010	173	435	1.06
44	Бикин – ст. Звеньевой	Красный Яр, Охотничий, Родниковая	21400	200	483	1.45
45	Горбун – с. Пушкино	Лермонтовка, Вяземская	143	126	673	2.43
46	Бира – с. Лермонтовка	Лермонтовка, Вяземская	728	169	673	2.66
47	Кия – с. Марусино	Гвасюги, Бичевая	505	187	877	2.64
48	Подхоренок – пос. Дормидонтовка	Вяземский, Переяславка, Бичевая	2330	147	724	2.34
49	Хор – пгт Хор	Бичевая, Сукпай, Гвасюги, Хор	24500	320	812	1.34
50	Манома – с. Манома 1-я	Аной, Троицкое	2220	238	627	1.24
51	Кичмари – с. Малмыж	Комсомольск-на-Амуре, Троицкое	62	156	573	0.91
52	Упагда – с. Упагда	Бурукан, Веселая Горка, им. Полины Осипенко	1120	155	521	1.61

Примечание. *S* – площадь водосбора, км²; *Q* – среднееголетний сезонный сток, мм; *P* – среднееголетние сезонные осадки, мм; *e* – коэффициент эластичности стока.

Note. *S* – catchment area, km²; *Q* – long-term average seasonal runoff, mm; *P* – long-term average seasonal precipitation, mm; *e* – elasticity coefficient.

Список литературы

1. Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Краснопеев С.М., Гарцман Б.И. Анализ пространственной дифференциации почвенного покрова юга Приморья на примере бассейна р. Комаровка. **2015.** *Почвоведение*, 3: 268–276. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15030028>
2. Гарцман Б.И. **2008.** *Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска.* Владивосток: Дальнаука, 223 с.
3. Гарцман Б.И. **2014.** Опыт гидрографического и ландшафтного описания речного бассейна на основе ГИС и геоданных. *Метеорология и гидрология*, 6: 67–79.
4. Гарцман Б.И., Галанин А.А. **2011.** Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты. *География и природные ресурсы*, 3: 27–37.
5. Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю. **2017.** Влияние изменений климата на максимальный сток в бассейне Амура: оценка на основе динамико-стохастического моделирования. *Водные ресурсы*, 44(5): 1–11. <https://doi.org/10.7868/S0321059617050066>
6. Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю. **2019.** Оценка изменений режима паводкового стока реки Усури с учетом современных климатических проекций до конца XXI века. *Гидросфера. Опасные процессы и явления*, 1(1): 51–69. <https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.006>
7. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. **2018.** Оценка изменений водного режима реки Амур в XXI веке при двух способах задания климатических проекций в модели формирования речного стока. *Водные ресурсы*, 45(3): 223–234. <https://doi.org/10.7868/S032105961803001X>
8. Мещенина Л.А., Новороцкий П.В., Пономарев В.И. **2007.** Климатические изменения и колебания стока Амура. *Вестник ДВО РАН*, 4: 44–54.
9. Мордовин А.М. **1996.** *Годовой и сезонный сток рек бассейна Амура.* Хабаровск: Ин-т водных и экологических проблем ХНЦ ДВО РАН, 72 с.
10. Новороцкий П.В. **2007.** Климатические изменения в бассейне Амура за последние 115 лет. *Метеорология и гидрология*, 2: 43–53.
11. Новороцкий П.В. **2011.** Современные климатические изменения в бассейне Амура и на побережье Японского моря. *Известия Русского географического общества*, 143(1): 41–48.
12. Новороцкий П.В. **2013.** Многолетние изменения температуры воздуха в бассейне реки Буря. *География и природные ресурсы*, 2: 118–124.
13. Хон В.Ч., Мохов И.И. **2012.** Гидрологический режим бассейнов крупнейших рек Северной Евразии в XX–XXI вв. *Водные ресурсы*, 39(1): 3–12

14. Barrera C., Cobo J., Souvignet M., J., Oyarzun J., Oyarzun R. **2020**. Streamflow elasticity, in a context of climate change, in arid Andean watersheds of north-central Chile. *Hydrological Sciences J.*, 65: 1707–1719. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1770764>
15. Chiew F. **2006**. Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrological Sciences J.*, 51(4): 613–625. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.613>
16. Chiew F., Peel M.C., McMahon T., Siriwardena L. **2006**. Precipitation elasticity of streamflow in catchments across the world. In: *Climate Variability and Change: Hydrological Impacts*. Wallingford, UK: IAHS Press, 256–262.
17. Chiew F., Potter N.J., Vaze J., Petheram C., Zhang L., Teng J., Post D.A. **2013**. Observed hydrologic non-stationarity in far south-eastern Australia: implications for modelling and prediction. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28: 3–15. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0755-5>
18. *IPCC: Climate Change 2013 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. **2013**. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1535 p.
19. Kim B.S., Hong S.J., Lee H.D. **2013**. The potential effects of climate change on streamflow in rivers basin of Korea using rainfall elasticity. *Environmental Engineering Research*, 18(1): 9–20. <https://doi.org/10.4491/eer.2013.18.1.009>
20. Krysanova V., Hattermann F.F. **2017**. Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results. *Climatic Change*, 141: 363–379. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1919-y>
21. Sankarasubramanian A., Vogel R. **2003**. Hydroclimatology of the continental United States. *Geophysical Research Letters*, 30(7). p. 1363. <https://doi.org/10.1029/2002gl015937>
22. Sankarasubramanian A., Vogel R., Limbrunner J. **2001**. Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 37(6): 1771–1781. <https://doi.org/10.1029/2000WR900330>
23. Seymenov K. **2020**. Climate elasticity of annual streamflow in Northwest Bulgaria. In: S. Nedkov et al. (eds). *Smart Geography. Key Challenges in Geography (EUROGEO Book Series)*. Cham: Springer Intern. Publ., 105–115.
24. Yang H., Yang D. **2011**. Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff. *Water Resources Research*, 47(7): W07526. <https://doi.org/10.1029/2010WR009287>
25. Zhou X., Zhang Y., Yang Y. **2015**. Comparison of two approaches for estimating precipitation elasticity of streamflow in China's main river basins. *Advances in Meteorology*, 2015: 1–8. <https://doi.org/10.1155/2015/924572>

References

1. Bugaets A.N., Pshenichnikova N.F., Tereshkina A.A., Krasnopeev S.M., Gartsman B.I. **2015**. Analysis of the spatial differentiation of the soil cover in the south of the Far East of Russia by the example of the Komarovka River basin. *Eurasian Soil Science*, 48(3): 231–239. <https://doi.org/10.1134/s1064229315030023>
2. Gartsman B.I. **2008**. [Rain floods on rivers: methods of calculation, forecasts, risk assessments]. Vladivostok: Dalnauka, 223 p. (In Russ.)
3. Gartsman B.I. **2014**. Hydrographic and landscape description of a river basin based on GIS- and geographic data. *Russian Meteorology and Hydrology*, 39(6): 407–415. <https://doi.org/10.3103/S1068373914060077>
4. Gartsman B.I., Galanin A.A. **2011**. Structural-hydrographic and morphometric analysis of river systems: Theoretical aspects. *Geography and Natural Resources*, 32(3): 226–234. <https://doi.org/10.1134/s1875372811030048>
5. Gartsman B.I., Lupakov S.Y. **2017**. Effect of climate changes on the maximal runoff in the Amur basin: estimation based on dynamic–stochastic simulation. *Water Resources*, 44(5): 697–706. <https://doi.org/10.1134/S0097807817050062>
6. Gartsman B.I., Lupakov S.Y. **2019**. Assessment of the Ussuri river flood regime changes regarding to climate projections to the end of the XXI century. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 1(1): 51–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.006>
7. Gelfan A.N., Kalugin A.S., Motovilov Y.G. **2018**. Assessing Amur water regime variations in the XXI century with two methods used to specify climate projections in river runoff formation model. *Water Resources*, 45(3): 307–317. <https://doi.org/10.1134/S0097807818030065>
8. Meshchenina L.A., Novorotsky P.V., Ponomarev V.I. **2007**. Climatic changes and fluctuations of the Amur runoff. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 4: 44–54. (In Russ.)

9. Mordovin A.M. **1996**. [Annual and seasonal river flow of Amur basin]. Khabarovsk: Inst. of Water and Ecology Problems, Khabarovsk Research Center, FEB RAS, 72 p. (In Russ.)
10. Novorotskii P.V. **2007**. Climate changes in the Amur river basin in the last 115 years. *Russian Meteorology and Hydrology*, 32(2): 102–109. <https://doi.org/10.3103/S1068373907020045>
11. Novorotsky P.V. **2011**. Recent climatic changes in the basin of Amur river and on the shore of Sea of Japan. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 143(1): 41–48. (In Russ.)
12. Novorotsky P.V. **2013**. Long term changes of air temperature in the Bureya river basin. *Geography and Natural Resources*, 2: 118–124. (In Russ.)
13. Khon V.C., Mokhov I.I. **2012**. The hydrological regime of large river basins in Northern Eurasia in the XX–XXI centuries. *Water Resources*, 39(1): 1–10. <https://doi.org/10.1134/S0097807812010058>
14. Barrera C., Cobo J., Souvignet M., J., Oyarzun J., Oyarzun R. **2020**. Streamflow elasticity, in a context of climate change, in arid Andean watersheds of north-central Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 65: 1707–1719. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1770764>
15. Chiew F. **2006**. Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4): 613–625. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.613>
16. Chiew F., Peel M.C., McMahon T., Siriwardena L. **2006**. Precipitation elasticity of streamflow in catchments across the world. In: *Climate Variability and Change: Hydrological Impacts*. Wallingford, UK: IAHS Press, 256–262.
17. Chiew F., Potter N.J., Vaze J., Petheram C., Zhang L., Teng J., Post D.A. **2013**. Observed hydrologic non-stationarity in far south-eastern Australia: implications for modelling and prediction. *Stoch. Env. Res. Risk A.*, 28: 3–15. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0755-5>
18. IPCC: *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. **2013**. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1535 p.
19. Kim B.S., Hong S.J., Lee H.D. **2013**. The potential effects of climate change on streamflow in rivers basin of Korea using rainfall elasticity. *Environmental Engineering Research*, 18(1): 9–20. <https://doi.org/10.4491/eer.2013.18.1.009>
20. Krysanova V., Hattermann F.F. **2017**. Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results. *Climatic Change*, 141: 363–379. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1919-y>
21. Sankarasubramanian A., Vogel R. **2003**. Hydroclimatology of the continental United States. *Geophysical Research Letters*, 30(7). p. 1363. <https://doi.org/10.1029/2002GL015937>
22. Sankarasubramanian A., Vogel R., Limbrunner J. **2001**. Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 37(6): 1771–1781. <https://doi.org/10.1029/2000WR900330>
23. Semyenov K. **2020**. Climate elasticity of annual streamflow in Northwest Bulgaria. In: S. Nedkov et al. (eds). *Smart Geography. Key Challenges in Geography (EUROGEO Book Series)*. Cham: Springer Intern. Publ., 105–115.
24. Yang H., Yang D. **2011**. Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff. *Water Resources Research*, 47(7): W07526. <https://doi.org/10.1029/2010WR009287>
25. Zhou X., Zhang Y., Yang Y. **2015**. Comparison of two approaches for estimating precipitation elasticity of streamflow in China's main river basins. *Advances in Meteorology*, 2015: 1–8. <https://doi.org/10.1155/2015/924572>

Об авторе

ЛУПАКОВ Сергей Юрьевич (ORCID 0000-0002-5804-2604), кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории гидрологии и климатологии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, rbir@mail.ru

About the Author

LUPAKOV Sergey Yur'evich (ORCID 0000-0002-5804-2604), Cand. of Sci. (Geography), Researcher of Laboratory of hydrology and climatology, Pacific Institute of Geography, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, rbir@mail.ru