



Сергей Юрьевич Лупаков

В 2015 г. окончил магистратуру Дальневосточного федерального университета по направлению «Техносферная безопасность», после чего поступил в очную аспирантуру ДВФУ по направлению «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия». Во время учебы освоил современные методы гидрологического моделирования.

С 2012 г. принимает участие в полевых работах на экспериментальных водосборах в составе лаборатории гидрологии и климатологии Тихоокеанского института географии ДВО РАН. Работает над кандидатской диссертацией на тему «Влияние изменений климата на максимальный сток рек бассейна Амура: оценка на основе динамико-стохастического моделирования» под руководством д.г.н. Б.И. Гарцмана.

Область научных интересов – детерминированное и стохастическое моделирование в гидрологии, климатические изменения, способы прогнозирования, а также проведение широкого спектра натурных наблюдений за элементами водного баланса на объектах Дальнего Востока.

Имеет публикации в научных изданиях. Занимал призовые места на конференциях молодых ученых в ДВФУ и ТИГ ДВО РАН. Участник международных и всероссийских конференций.

УДК 556.16:551.583

DOI: 10.25808/08697698.2019.204.2.016

С.Ю. ЛУПАКОВ

Паводковый сток на реках Приморья в условиях меняющегося климата: моделирование, методы, результаты

Исследуются характеристики максимального стока в теплый период года как наиболее подверженный мощным дождевым паводкам. Использование динамико-стохастического подхода позволило определить реакцию речных бассейнов на изменения климата, задаваемые через вход в гидрологические модели. Установлено, что в бассейне р. Усури – ПТТ Кировский максимальные расходы воды рек растут существенно непропорционально относительно изменения нормы осадков как основного приходного элемента водного баланса. На основании вычислительных экспериментов, в том числе с использованием данных глобальных климатических моделей, делается вывод о возможном росте паводковой опасности в регионе в XXI в.

Ключевые слова: дождевые паводки, бассейн Усури, моделирование, изменения климата.

Flood flow of Primorye rivers under the climate changes conditions: modeling, methods, results.
S.Yu. LUPAKOV (Pacific Institute of Geography, FEB RAS, Vladivostok).

The regime of the maximal flow in warm period, as the most liable to sudden rainfall floods is studied. The dynamic-stochastic approach was applied to estimate river basins response to the climate changes as input for hydrological models. It has been found that in the Ussuri River Basin maximal river discharges rise disproportionately according to increasing precipitation value, as the main part of the water balance equation. Based on accomplished calculations,

ЛУПАКОВ Сергей Юрьевич – младший научный сотрудник (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток). E-mail: darkbelka92@gmail.com

including data of the General Circulation Models, it is concluded that the possible flood increase is expected in the nearest future (XXI century).

Key words: rainfall floods, Ussuri River Basin, modeling, climate changes.

Юг Дальнего Востока России в гидрологическом отношении существенно отличается от остальной территории России в первую очередь за счет прохождения большей части стока в теплый период в виде дождевых паводков. Это связано как с особенностями атмосферной циркуляции, выражающейся в ее муссонной составляющей, так и с периодическим выходом к побережью Приморского края из более южных регионов тайфунов, приносящих значительные объемы влаги. Подобная уникальность затрудняет применение моделей и различных расчетных схем, хорошо зарекомендовавших себя в других условиях. С учетом ныне фиксируемых климатических изменений, а также ряда гидрологических событий редкой повторяемости в пределах бассейна Амура [3] задача отработки методики и получения адекватного прогноза режима максимального стока становится несколько комплексной, настолько и актуальной.

С точки зрения гидролога базовыми климатическими переменными считаются приповерхностные температуры воздуха, количество осадков и речной сток. Относительно потепления территории юга Дальнего Востока сомнений в общем мало [1, 9, 11], однако с анализом остальных элементов ситуация обстоит существенно сложнее. В литературе отмечаются разнонаправленные изменения в рядах как стока, в том числе максимального [7, 12–14], так и осадков [2, 8, 10, 15, 16].

Попытка выявления трендов на основе статистических критериев для исследуемого в настоящей работе бассейна р. Усури – ПГТ Кировский (рис. 1) в целом подтвердила уже полученные данные. Во-первых, статистически значимый рост в рядах температур выявлен по всем отдельным месяцам, кроме июля и августа, т.е. потепление затрагивает

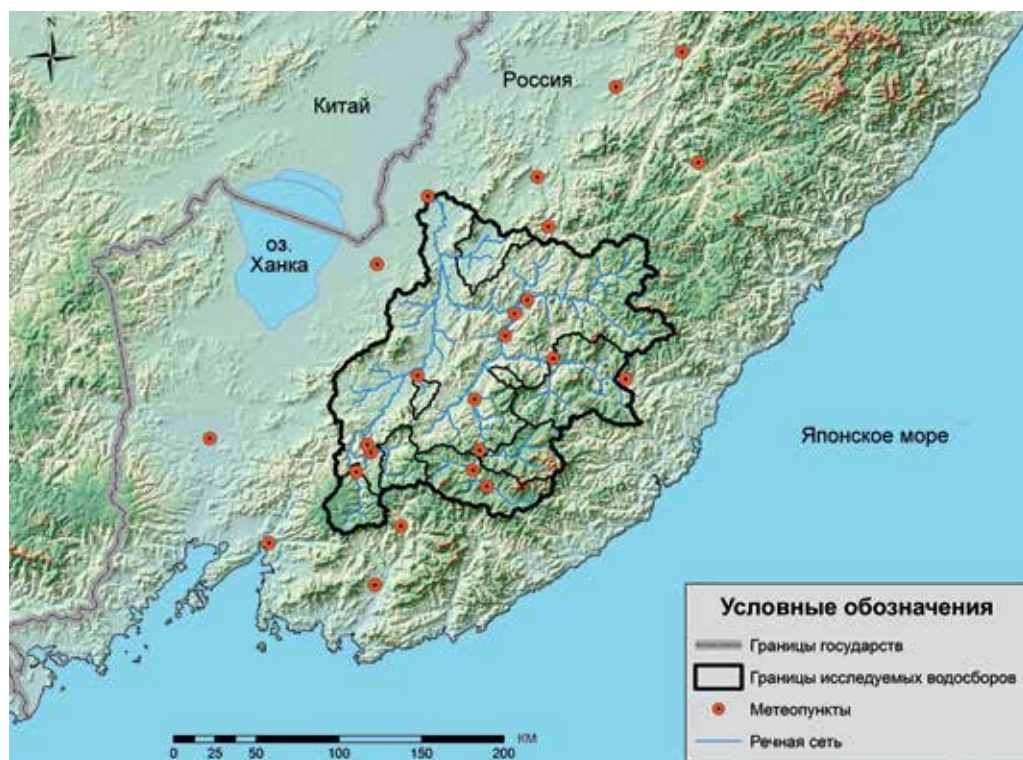


Рис. 1. Картограмма исследуемого района: водосбор р. Усури – ПГТ Кировский и набор малых речных бассейнов в его пределах (используются для расчета стока в замыкающем створе)

большую часть года. Во-вторых, осадки изменяются неравномерно, географически неупорядоченно и с малой степенью надежности, причем сток растет в январе, феврале и марте, снижается в июне. Объяснение, по-видимому, состоит в том, что потепление приводит к более раннему вскрытию рек, более быстрому снеготаянию и переходу температуры воздуха через 0 °С, а фиксируемый речной сток формируется в условиях пониженного испарения, что обуславливает его рост в статистическом отношении. При этом сдвигаются характерные сроки гидрологического режима, т.е. половодье проходит раньше, за ним следует межень – фаза пониженного стока, смещение которой на июнь и выражается в отрицательном тренде.

Таким образом, можно заключить, что климатические изменения (в первую очередь потепление) на исследуемой территории уже происходят, хотя период наибольшей паводковой опасности (июнь–сентябрь) в настоящее время является более или менее устойчивым. Тем не менее известно соотношение Клаузиуса–Клапейрона, по которому более теплая атмосфера должна содержать большее количество влаги (теоретически рост температуры на 1 К вызывает рост влагосодержания на 7 %) [17], что, в частности, ведет к увеличению вероятности наступления гидрометеорологических событий редкой повторяемости. В Пятом отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [19] указано на подверженность высоких широт и муссонных областей описываемым эффектам, что вызывает необходимость в случае реального увеличения увлажнения иметь расчетные средства по прогнозированию обсуждаемых явлений.

Одним из эффективных способов оценки гидрологических последствий при климатических изменениях является динамико-стохастический подход к моделированию. Он подразумевает использование двух подмоделей: первая формирует последовательности метеорологических характеристик, которые подаются на вход во вторую – гидрологическую, преобразующую все многообразие входных данных в сток, т.е. в упрощенном виде вторая подмодель выполняет функцию реального речного бассейна. При этом на вход подаются ряды данных длительностью в сотни–тысячи лет, краевые условия на основе метода Монте-Карло многократно «перебираются» (чтобы учесть все возможное многообразие климатических ситуаций), а в итоге модельные кривые обеспеченности по стоку и статистические параметры представляют собой результат осреднения многочисленных синтетических реализаций.

В качестве гидрологической в настоящей работе была использована модель паводочно-го цикла (Flood Cycle Model, FCM) – региональная разработка [4], созданная на базе качественных данных Приморской водно-балансовой станции, имеющая только один входной параметр – осадки. Модель широко тестирована и апробирована на объектах Дальнего Востока (бассейны Амура, Японского моря, о-в Сахалин), Сибири (бассейн оз. Байкал), Кавказа. Зарубежный опыт включает работу на данных о-ва Тайвань и горных объектов Австрии. Совпадение рассчитанного стока с реально измеренным для условий высокого стока очень хорошее, для условий межени и засух – скромное, что лежит в основе философии модели. Основные преимущества модели – малое количество параметров (имеющих ясный физический смысл), небольшое количество информации, необходимое для работы модели (ряды суточных осадков и стока), простота ее освоения и использования. Главными ограничениями модели являются ее применимость только к малым однородным водосборам и только в теплые периоды с чисто дождевым питанием, а также ориентация на описание высоких и экстраординарных паводков.

Для расчета стока с крупных водосборов на основе FCM моделируются слои стока с малых бассейнов (так называемых «бассейнов-индикаторов», являющихся репрезентативными и отражающих особенности стокоформирования на определенной доле территории большего бассейна), которые затем трансформируются в сток в замыкающем створе [4].

Использование описываемых гидрологических моделей в оперативной практике Дальневосточного и Приморского управлений по гидрометеорологии и мониторингу

окружающей среды (УГМС) в течение примерно 10 лет демонстрирует хорошее и удовлетворительное качество прогнозирования.

Вопрос, какую гидрологическую модель использовать, непростой, однако вполне решаемый: для определенного региона или конкретной цели гидрологи имеют выбор из всего многообразия реализованных расчетных комплексов. Выбор же модели, формирующей климатический вход, в нашем случае значительно сложнее – автору неизвестны адаптированные для территории Приморского края и подготовленные к работе модели регионального масштаба в свободном доступе, доведенные до широкого круга пользователей, хотя работы в данном направлении, безусловно, ведутся и определенный прогресс уже достигнут (см, напр., работу [18]). В связи с этим видится очевидным использование следующих вариантов решения названной проблемы: трансформация фактически измеренных метеорологических данных в рамках гипотез об их будущем поведении; попытка адаптации уже существующих моделей к региональным задачам; использование «вырезов» из покрытия глобальных климатических моделей и сценариев применительно к региону.

Стоит отметить, что в нашем случае учет только климатических переменных (в первую очередь осадков) уже позволяет сделать более или менее точный гидрологический прогноз. Это означает, что «вес» точности моделирования осадков значительно существеннее всех остальных факторов.

В рамках предполагаемого увеличения паводковой опасности в регионе был произведен ряд расчетов, направленных на рост увлажнения в бассейне р. Уссури – ПГТ Кировский (ассоциированного с набором малых речных бассейнов в его границах) с июня по сентябрь. Основными расчетными характеристиками были максимальные расходы воды (в мм/сут) за сезон и суммарный слой стока (в мм). Единицы измерения в виде слоев весьма удобны (объем стока за время к площади водосбора) и позволяют сравнивать водосборы рек различных размеров в смысле их водоносности.

При использовании самого простого, условно говоря, климатического сценария – увеличения фактически измеренных осадков – был получен вывод о существенно непропорциональном росте исследуемых стоковых характеристик на малых речных бассейнах: рост осадков на 10 % приводил к увеличению максимальных расходов на 17–39 %, суммарного слоя стока – на 12–23 %; рост осадков на 20 % – к увеличению указанных параметров на 42–85 % и 24–48 % соответственно. Для исследуемого створа р. Уссури – ПГТ Кировский эти значения несколько меньше: при 10- и 20 %-м увеличении осадков максимальные расходы увеличиваются на 15 и 42 %, суммарный слой стока – на 11 и 31 % соответственно.

Другой вариант простейшего задания климатического сценария – «аналоговый», при котором на исследуемые водосборы подаются осадки не с ближайших, а с находящихся в существенно иных условиях метеопунктов. Были использованы две группы метеостанций в рамках подобного подхода: «континентальная» (метеостанции Центрального Сихотэ-Алиня) и «морская» (метеостанции юга Приморья), при этом считалось, что альтернативные условия «наступают» на исследуемую территорию, меняя ее характеристики. Обе выборки обеспечивают рост нормы осадков примерно на 15 %, однако это происходит за счет разного внутригодового распределения. Результаты расчетов с этим вариантом показали, что итоговая разница между двумя группами метеостанций в стоке достаточно серьезная (особенно для максимальных расходов), тем не менее их осреднение дает результат, близкий к технически простому увеличению осадков на коэффициент, поэтому в дальнейшем не рассматривается.

Следующий реализованный вариант состоял в адаптации стохастической модели метеозлементов [6], так называемого «генератора погоды», основу которого составляет метод пространственных фрагментов, к работе в условиях Дальнего Востока. Модель неплохо воспроизводит нормы сезонных сумм осадков, однако расчет стока на ее основе показал наличие погрешностей, особенно для замыкающего створа р. Уссури – ПГТ Кировский. Тогда алгоритм модели был немного доработан на основе типизации гидрографов рек юга Дальнего Востока, предложенной в работе [5], т.е. осадки в предложенной версии

моделируются принадлежащими к подвыборке «влажных» или «сухих» сезонов на основе гидрологической классификации. Усовершенствованная версия модели позволила сделать поведение осадков в области максимальных значений и внутрисезонное распределение дождей более близкими к реальным, что отразилось в более качественном воспроизведении наблюдаемого стока гидрологической моделью.

На основе описанной регионализированной разработки проведен расчет стока на ближайшие 50–100 лет. Климатический сценарий задавали в виде так называемой «климатической проекции», т.е. предположения о том, как будут себя вести обсуждаемые характеристики. Норма осадков в модели была увеличена на 20 % от нынешней, это вызывает рост не только объема дождей, но и вероятности разыгрывания в модели «влажных» сезонов, что в последнее время и наблюдается в природе. Также на основе простой, но достаточно эффективной формулы Л. Одина [20] было учтено изменение испарения, которое для исследуемых объектов составило 110 % от современного. Анализ полученного материала показал, что увеличение испарения не оказывает существенного влияния на режим максимального стока, а исследуемые стоковые характеристики, как и ранее, ведут себя весьма непропорционально: для малых речных бассейнов рост норм максимальных расходов при обсуждаемом росте осадков на 20 % составил 28–113 %, рост суммарного слоя стока – 32–53 %, для замыкающего створа р. Уссури – ПГТ Кировский – 43 и 45 % соответственно.

Примененные выше климатические проекции показывают, что речные бассейны работают в виде своеобразных «усилителей»: сигнал на выходе превышает (в процентах) сигнал на входе в 1,5–5 раз. Это объясняется существованием нескольких режимов стокоформирования, которые учитываются в модели FCM. В бытовых условиях (не паводковые события) реализуется только подповерхностный вариант, т.е. вода до русла доходит преимущественно подземными путями, на это тратится время и существуют различного рода «потери» стока. При сильных паводках отклик гидрологических систем становится нелинейным за счет широкого развития поверхностного стекания на склонах водосборов (так называемая «микроручейковая сеть»). В таких условиях при увеличении количества осадков происходит рост не только суммарного объема стока, но и количества случаев, когда бассейновая емкость переполняется и реализуется второй («поверхностный») режим стекания, при этом количество таких случаев может расти непропорционально, что и показывают результаты расчетов. Однако использованные выше проекции подразумевают в определенной степени гипотетические варианты развития событий.

Третий вариант, использованный в настоящей работе и более близкий к реальности, состоит в применении данных глобальных климатических моделей (General Circulation Model, далее GCM), полученных при реализации международного проекта ISI-MIP (The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) [22]. В рамках этой инициативы были рассчитаны многочисленные характеристики в узлах сетки с шагом в $0,5^\circ$ по широте и долготе до 2100 г. Нами использовались данные о суточных осадках с пяти GCM (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M) и по четырем климатическим сценариям семейства RCP (Representative Concentration Pathways), определяющим суммарную величину радиационного воздействия в 2100 г. по сравнению с 1750 г. и широко используемым в климатических исследованиях. Таким образом, для каждого водосбора подразумевается 21 расчет (5 моделей \times 4 сценария + 1 ансамблевый).

Однако прямое применение данных GCM в нашем случае имеет недостаток: пространственный масштаб является достаточно грубым для полноценных расчетов. Для нивелирования этого эффекта была применена процедура «даунскейлинга» (англ. downscaling), т.е. приведение данных к необходимому масштабу на основе метода delta-change [21]: было рассчитано отношение («дельта») между нормами осадков по отдельным моделям и сценариям к 2100 г. и «историческим» модельным периодом (до 2005 г.), которое вносилось в исходную норму в стохастическую региональную модель осадков. Изменение осадков таким способом представляется результатом реализации совмещения полноценных

климатических сценариев и глобальных климатических моделей, данные (осадки) которых пропущены через своеобразный региональный «фильтр». Изменение испарения рассчитывалось как и ранее.

Вычислительные эксперименты показали, что различное сочетание GCM и RCP вызывает разную реакцию в стоке, размах варьирования весьма широкий. Причина этого кроется в существенно различных алгоритмах, заложенных в глобальные модели, причем нет очевидных доказательств превосходства одной модели над другими. Поэтому своеобразным стандартом является ансамблевый прогноз, при котором результаты расчетов по разным моделям и сценариям осредняются. Ансамблевые кривые обеспеченности малых речных бассейнов (рис. 2) в целом находятся выше эмпирических, что означает общее увеличение стока. Это подтверждается и при анализе норм: для максимальных расходов нормы растут на 9–13 %, для суммарного слоя стока – на 6–20 % относительно текущих условий. Однако более интересными в плане паводковой опасности являются расчетные значения расходов малой обеспеченности (1 и 5 % – значения расходов, теоретически наблюдающиеся 1 и 5 раз в 100 лет), соответствующих редким паводковым событиям.

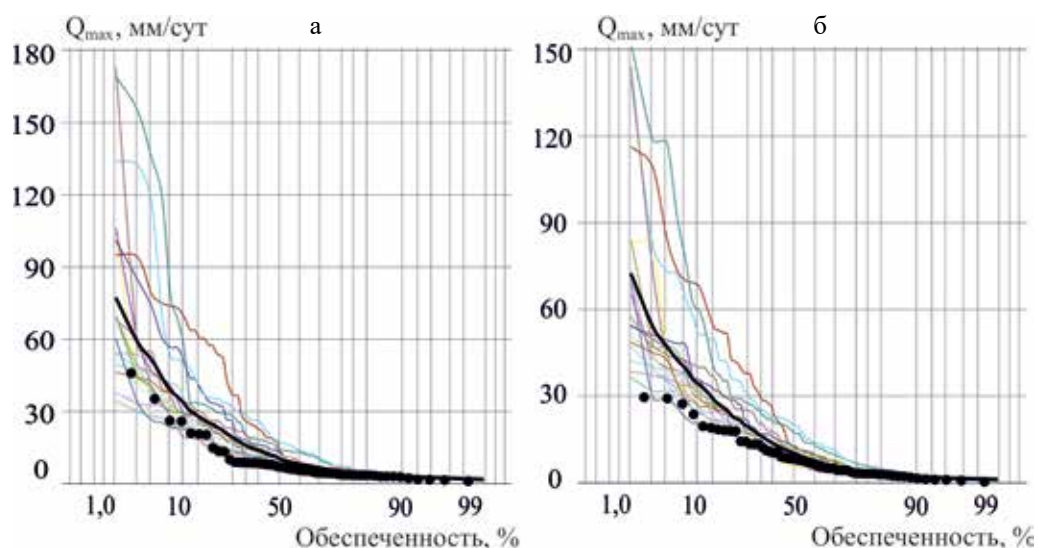


Рис. 2. Примеры кривых обеспеченности максимальных расходов с использованием данных GCM: а – для р. Извилинка – пос. Извилинка, б – для р. Муравейка – с. Гродеково. Точки – эмпирическая кривая (фактически измеренные максимальные расходы), тонкие линии – кривые с различным сочетанием GCM и RCP, жирная линия – ансамблевый расчет

При расчете отношения между полученными значениями и такими же, но посчитанными по фактически измеренным осадкам (текущий момент), получается, что в большинстве случаев (15 из 21 – см. рис. 3) фиксируется рост максимальных расходов малой обеспеченности на будущее относительно исторического периода.

Это означает, что редкие события паводкового характера будут заметно сильнее, чем наблюдаемые ныне. Осредненный ансамблевый рост составляет по всем объектам около 110 %. Необходимо повторить, что в данном случае обсуждаются явления выдающихся масштабов очень редкой повторяемости, при прохождении которых наносится внушительный экономический урон, существует риск людских потерь. За счет широкого развития нелинейных связей при таких событиях «стоимость» каждого процента может быть огромна.

Таким образом, совместная интерпретация всего объема полученных данных при существенно различных способах представления будущих климатических условий свидетельствует о росте паводковой опасности, который, что важно, может идти непропорционально при предполагаемом увеличении увлажнения.

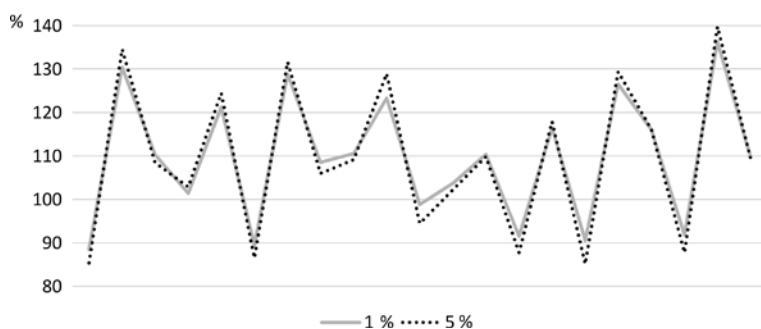


Рис. 3. Осредненное (по всем исследуемым бассейнам) отношение максимальных расходов, рассчитанных по GCM и на текущий момент. В ряд выстроен 21 расчет (пояснения в тексте). 1 и 5 % – значения максимальных расходов 1- и 5%-й ответственности соответственно

В целом протестированная методика позволяет в краткие сроки давать прогноз характеристик максимального стока, в том числе на сверхдолгосрочную перспективу в условиях изменяющегося климата. Известно, что подавляющая часть неопределенностей в ансамблевых расчетах происходит из климатических моделей и сценариев. Таким образом, в рамках объединения нескольких моделей, приведенных к региональному масштабу, адекватное прогнозирование как минимум осадков позволит сделать достаточно точный гидрологический прогноз. До тех пор получаемые оценки могут считаться приблизительными, отражающими в большей степени общее поведение стоковых характеристик на исследуемой территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филиппова И.А. Современные изменения климатических характеристик в бассейне Амура // Сб. тр. Всерос. науч. конф. «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2015. Т. 1. С. 87–93.
2. Бышев В.И., Нейман В.Г., Пономарев В.И. и др. Роль глобальной атмосферной осцилляции в формировании климатических аномалий Дальневосточного региона России / В.И. Бышев, В.Г. Нейман, В.И. Пономарев, Ю.А. Романов, И.В. Серых, Т.В. Цурикова // Докл. АН. 2014. Т. 458, № 1. С. 92–96.
3. Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю. Влияние изменений климата на максимальный сток в бассейне Амура: оценка на основе динамико-стохастического моделирования // Водн. ресурсы. 2017. Т. 44, № 5. С. 1–11.
4. Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 241 с.
5. Гарцман И.Н., Лыло В.М., Черненко В.Г. Паводочный сток рек Дальнего Востока. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 264 с.
6. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования // Лед и Снег. 2015. Т. 55, № 4. С. 61–72.
7. Добровольский С.Г. Оценка возможных изменений речного стока в XXI веке как проблема глобальной гидрологии // Тр. Всерос. науч. конф. «Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения». Сочи, 2017. С. 59–66.
8. Мохов И.И. Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне реки Амур в условиях глобального потепления // Докл. АН. 2014. Т. 455, № 5. С. 585–588.
9. Новороцкий П.В. Современные климатические изменения в бассейне Амура и на побережье Японского моря // Изв. Рус. геогр. о-ва. 2011. Т. 143, № 1. С. 41–48
10. Пономарев В.И., Дмитриева Е.В., Шкорба С.П. Особенности климатических режимов в северной части Азиатско-Тихоокеанского региона // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС, 2015. Вып. 1 (21). С. 67–72.
11. Ростов И.Д., Рудых Н.И., Ростов В.И., Воронцов А.А. Проявления глобальных климатических изменений в прибрежных водах северной части Японского моря // Вестн. ДВО РАН. 2016. № 5. С. 100–112.
12. Семенов В.А. География экстремального стока и частоты опасных гидрологических явлений на реках России при современном климате // Вестн. Калуж. ун-та. 2016. Т. 33, № 4. С. 88–95
13. Фролов А.В., Георгиевский В.Ю. Экстремальный паводок 2013 г. в бассейне р. Амур // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации: сб. докл. М.: Росгидромет, 2014. С. 5–39.

14. Хон В.Ч., Мохов И.И. Гидрологический режим бассейнов крупнейших рек Северной Евразии в XX–XXI вв. // Водн. ресурсы. 2012. Т. 39, № 1. С.1–10.
15. Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н., Мандыч А.Ф. Увлажнение водосбора реки Зея по метеорологическим и спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 305–314.
16. Шатилина Т.А., Анжина Г.И. Особенности атмосферной циркуляции и климата на Дальнем Востоке в начале XXI века // Изв.ТИНРО: сб. науч. тр. Владивосток, 2008. Т. 152. С. 225–239.
17. Boer G.J. Climate change and the regulation of the surface moisture and energy budgets // *Clim. Dyn.* 1993. Vol. 8. P. 225–239.
18. Bugaets A., Gartsman B., Gelfan A. et al. The integrated system of hydrological forecasting in the Ussuri river basin based on the ECOMAG model / A. Bugaets, B. Gartsman, A. Gelfan, Y. Motovilov, L. Gonchukov, A. Kalugin, V. Moreido, Z. Suchilina, E. Fingert, O. Sokolov // *Geosciences (Switzerland)*. 2018. Vol. 8, N 5. P. 5.
19. IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental panel on Climate Change.* Cambridge; New York: Cambridge university press, 2013. 1535 p.
20. Oudin L., Hervieu F., Michel C. et al. Which potential evapotranspiration in put for a lumped rainfall–runoff model? Pt 2: Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling / L. Oudin, F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andreassian, F. Anctil, C. Loumagne // *J. Hydrol.* 2005. Vol. 303, iss. 1–4. P. 290–306.
21. Trzaska S., Schnarr E. A review of downscaling methods for climate change projections (Technical report, United States Agency for international development). Burlington, Vermont: Tetra Tech ARD, 2014. 56 p.
22. Warszawski L., Frieler K., Huber V. et al. The inter-sectoral impact model intercomparison Pproject (ISI-MIP): project framework / L. Warszawski, K. Frieler, V. Huber, F. Piontek, O. Serdeczny, J. Schewe // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2014. Vol. 111, iss. 9. P. 3228–3232.