

Гидрологические исследования в Тихоокеанском институте географии ДВО РАН

Владимир Владимирович ШАМОВ
Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия
vshamov@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9310-1836>

Лариса Вячеславовна ГОРБАТЕНКО
Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия
glv@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2839-3371>

Аннотация. В статье приводится обзор гидрологических исследований в Тихоокеанском институте географии ДВО РАН. Исследования начались в 1975 г. с момента создания в лаборатории охраны окружающей среды группы гидрологии. Их тематика в конце 1970-х и в 1980-е гг. была связана с оценкой речного стока как ресурса для экономического развития региона Дальнего Востока и включала анализ особенностей пространственного распределения гидрологических характеристик. Позднее разработанные подходы к оценке водных ресурсов применялись на различных масштабных уровнях (восточная зона БАМ, бассейн оз. Ханка, территория г. Артем и др.). С 2005 г. гидрологические исследования были в основном сосредоточены в созданной лаборатории гидрологии и климатологии (ЛГиК), а также с 2019 г. – в лаборатории моделирования динамики геосистем. В задачи ЛГиК входят оценка пространственной и временной изменчивости водного баланса, характеристик гидрологического режима водных объектов, изучение закономерностей морфологии и пространственных структур речных и озерных бассейнов и разработка моделей этих структур на основе ГИС-технологий, исследование причин и механизмов опасных гидрологических явлений в условиях изменяющегося климата и ландшафтных преобразований, развитие методов моделирования генезиса речного стока. Разработана оригинальная модель паводочного цикла малого речного бассейна и приведены результаты ее применения для решения ряда задач, в том числе для сценарного прогноза характеристик гидрологического режима рек, дана оценка гидрологических откликов на климатические тенденции в регионе. Выполнен сравнительный анализ применения различных гидрологических моделей для оценки генетической структуры стока на примере малых экспериментальных бассейнов Приморья. Создан рабочий макет интегрированной системы гидрологического моделирования, основанной на использовании данных автоматизированной сети государственного гидрометеорологического мониторинга и оперативных прогностических данных синоптических моделей, а также на применении открытого европейского стандарта моделирования Open Modelling Interface. Исследованы пространственные закономерности формирования и распределения максимального стока рек для различных территорий.

Ключевые слова: водные ресурсы, пространственное распределение, водный баланс, модель паводочного цикла, гидрологические модели.

Для цитирования: Шамов В.В., Горбатенко Л.В. Гидрологические исследования в Тихоокеанском институте географии ДВО РАН // Тихоокеанская география. 2022. № 4. С. 17–28. https://doi.org/10.35735/26870509_2022_12_2. EDN: QJEPQK.

Hydrological Research at the Pacific Geographical Institute FEB RAS

Vladimir V. SHAMOV

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
vshamov@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9310-1836>

Larisa V. GORBATENKO

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
glv@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2839-3371>

Abstract. The article provides an overview of hydrological research at the Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The research began in 1975 with the creation of a hydrology group in the Laboratory of Environmental Protection, and their research topics in the late 1970s through 1980s were associated with the assessment of river runoff as a resource for the regional economic development and included an analysis of the features of the spatial distribution of hydrological characteristics. Later, the developed methods for assessing water resources were applied at various scale levels (the eastern zone of the Baikal-Amur Mainline, the basin of the Khanka Lake, the territory of the city of Artyom, etc.). Since 2005, hydrological research have been mainly consolidated in the later established Laboratory of Hydrology and Climatology (LHC), and since 2019 – in the Laboratory of Modeling the Geosystems Dynamics. The objectives of the LHC include the following: assessment of the spatial and temporal variability of the water balance, the characteristics of the water bodies' hydrological regime, the study of the patterns of morphology and spatial structures of river and lake basins and the development of models of these structures based on GIS technologies, the study of the causes and mechanisms of dangerous hydrological phenomena under conditions of changing climate and landscape transformations, and development of methods for modeling the river runoff generation. An original model of the flood cycle of a small river basin has been developed and the results of its application for solving a number of problems, including scenario forecasting of the characteristics of the hydrological regime of rivers, have been presented, and an assessment of hydrological responses to climate trends in the region has been given as well. A comparative analysis of the application of various hydrological models to assess the genetic structure of runoff has been performed using the example of small experimental basins in Primorye. A working layout of an integrated hydrological modeling system based on the use of data from the automated network of the state hydrometeorological monitoring and operational forecast data of synoptic models, as well as on the use of the open European modeling standard, Open Modeling Interface, has been created. The spatial regularities of the formation and distribution of the maximum river flow on different territories have been studied.

Keywords: water resources, spatial distribution, water balance, flood cycle model, hydrological models, small experimental basins.

For citation: Shamov V.V., Gorbatenko L.V. Hydrological Research at the Pacific Geographical Institute FEB RAS. *Pacific Geography*. 2022;(4):17-28. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2022_12_2.

Введение

Территория Дальнего Востока находится в Азиатско-Тихоокеанской прибрежной зоне, в нескольких природных поясах с соответствующим климатом, различной увлажненностью, в зоне влияния восточноазиатского внутритропического муссона и частично – многолетней мерзлоты. Следствием этого являются контрастность стоковых характеристик и чрезвычайная неустойчивость гидрологического режима в разных временных масштабах. Перед гидрологической наукой региона как комплексной дисциплиной,

изучающей процессы, происходящие в гидросфере, их связь с иными геофизическими процессами, с прикладной точки зрения стояли задачи, связанные с обеспечением водой населения и экономики, с борьбой с наводнениями и другими видами негативного воздействия вод, а также с охраной водных ресурсов. Именно этим и определялась основная тематика гидрологических исследований в ТИГ ДВО РАН на протяжении почти 50 лет.

Целью статьи является краткий обзор направлений и основных результатов этих исследований на различных этапах развития Тихоокеанского института географии.

Результаты и обсуждение

XX в. Гидрологические исследования в ТИГ, созданном в 1971 г., начались в комплексной лаборатории охраны окружающей среды под руководством В.Г. Коноваленко (с 1980 г. – Б.В. Пояркова) после создания в ней в 1975 г. группы гидрологов, в состав которой входили выпускники ДВГУ, и были продолжены в лаборатории географических основ природопользования¹. Региональные исследования ТИГ в области гидрологии не были пионерными. К этому моменту определенные данные о пространственных и временных закономерностях речного стока в регионе уже были получены. Была издана серия монографий, подготовленных специализированными государственными учреждениями², в которых были обобщены данные наблюдений за речным стоком на постах государственной сети наблюдений за период от их начала до 1962–1968 гг., приведены описания рек и характеристики их бассейнов. Исследования структуры речной сети, условий формирования стока и его закономерностей проводились на основе региональных данных также и в ДВНИГМИ, созданном в 1950 г.

Гидрологические исследования в ТИГ в конце 1970-х – 1980-е гг. имели свою специфику, которая определялась одним из научных направлений института, связанным с разработкой научных основ региональной схемы рационального природопользования и охраны окружающей среды для Дальневосточного региона. В это время ТИГ был головной организацией Комиссии по проблемам охраны окружающей среды Межведомственного координационного совета при Президиуме ДВНЦ АН СССР, участвовал в ряде крупных общесоюзных и региональных научных проектов³, координируемых организациями и структурами различного уровня⁴.

Разделы, связанные с водными ресурсами, были составной частью каждого из выполнявшихся тогда проектов, их оценка была как отдельной самостоятельной научной задачей, так и частью методического подхода при оценке водохозяйственных проблем территории региона. Поскольку анализу подвергалась обширная территория Дальнего Востока, необходим был поиск показателей мелкомасштабной оценки состояния водных ресурсов, для чего требовался подбор экспрессных и удобных для расчета характеристик.

Для оценки водных ресурсов было введено понятие водно-ресурсного потенциала (ВРП) [1]. Из-за высокой неравномерности внутригодового и многолетнего режима рек Дальнего Востока оценка ВРП по значениям стока заданной обеспеченности была

¹ Сменившей в конце 1980-х гг. название на лабораторию региональных систем природопользования.

² Главное управление Гидрометеослужбы при Совмине СССР, Дальневосточное управление Гидрометеослужбы, Государственный гидрологический институт с участием специалистов Приморского, Забайкальского, Колымского, Камчатского управлений ГМС, ДВНИГМИ и др.

³ КП НТП на 1991–2010 гг. по научному направлению «Природные ресурсы СССР на 20 лет (по пятилеткам)»; «Научные основы сохранения и улучшения окружающей среды и рационального использования природных ресурсов»; «Разработка общей методики составления территориальных комплексных схем охраны природы»; «Генсхема рационального природопользования Дальнего Востока»; подпрограмма «Рациональное природопользование» комплексной целевой программы «Дальний Восток» и др.

⁴ Проблемная комиссия «Природные ресурсы СССР» Научного совета по проблемам научно-технического и социально-экономического прогнозирования АН СССР и ГКНТ СССР, Научный совет по проблемам биосферы при Президиуме АН СССР и др.

признана не вполне адекватной. Основным показателем для его оценки был выбран базисный сток, т.е. сток за период, когда он не превышал среднемноголетнее значение, характеризующий устойчивую и поэтому наиболее доступную для хозяйственного использования составляющую водных ресурсов территории и включающий подземный сток, дренируемый водотоком [2]. Кроме того, использовались такие характеристики, как норма стока, модуль расчетного минимального стока и степень концентрации ресурса по величине площади водосбора, наличие транзитного водотока, объем стока которого не учитывался. Для определения расчетных характеристик, выбранных для оценки водообеспеченности территории на участках без данных гидрологических наблюдений, было проведено выделение бассейнов-аналогов, для неизученных водосборов характеристики рассчитывались методом гидрологической индикации с учетом густоты речной сети [3, 4].

Были составлены карты водообеспеченности различных территорий (Дальнего Востока в целом, Приморского края, бассейна оз. Ханка и др.) [5]. Принятые методические подходы к оценке водных ресурсов территории были использованы далее при исследованиях Амуро-Комсомольского ТПК, восточной зоны БАМ, при разработке Экологической программы Приморского края и др. В результате проведенных исследований было установлено, что для большей части территории Дальнего Востока характерны неблагоприятные условия для организации водопользования потребителей вследствие низкой ее водоносности и умеренно неустойчивого режима стока. Следует признать, что полученные оценки отражали географическую дифференциацию территории по условиям водоносности, но были при этом довольно условными и не служили целям инженерно-гидрологических расчетов.

XXI в. В настоящее время гидрологические исследования института в основном сосредоточены в лаборатории гидрологии и климатологии (ЛГиК), кроме этого, в лаборатории моделирования динамики геосистем (ЛМДГ) (с 2019 г.). ЛГиК была создана на основе группы моделирования гидрометеорологических систем в 2005 г. по инициативе д.г.н. Б.И. Гарцмана и на данный момент объединяет восемь сотрудников, из которых два доктора наук и три кандидата наук. Целью программы-максимум исследований лаборатории является развитие фундаментальных знаний о механизмах функционирования речных систем в условиях неустойчивого режима, обусловленного изменениями климата и ландшафтов.

Задачами исследований коллектива ЛГиК являются:

- аккумуляция, анализ и обобщение данных гидрометеорологических наблюдений в Дальневосточном регионе РФ и других регионах мира в виде цифровых архивов (электронных таблиц) и формирование комплексных геоинформационных баз данных об экспериментальных речных бассейнах;
- исследование пространственной и временной изменчивости водного баланса, гидрологического режима водных объектов суши и температуры приземного слоя атмосферы в локальном и региональном масштабах;
- изучение морфологии и пространственных структур речных и озерных бассейнов, разработка статических и динамических моделей структуры речных систем;
- исследование катастрофических и опасных гидрологических явлений в условиях изменяющегося климата и ландшафтных преобразований;
- развитие методов исследования генезиса речного стока в условиях нестационарного климата на основе данных государственного и специального гидрометеорологического мониторинга.

Моделирование гидрологических процессов

Математическое моделирование как наиболее строгий и перспективный метод исследований является в то же время и наиболее сложным, что обусловлено

исключительной сложностью описываемых гидрометеорологических процессов, поэтому использование гидрологических моделей для различных задач, в т.ч. прогнозирования, остается предметом самых острых научных и околонучных дискуссий.

В ЛГиК д.г.н. Б.И. Гарцманом была разработана модель паводочного цикла малого речного бассейна (ПЦ-модель, FCM), которая описывает динамику основных компонентов бассейнового влагозапаса вблизи и выше состояния полной влагоемкости бассейна, когда он находится в стадии формирования дождевого паводка [6]. Ключевым оригинальным постулатом модели является наличие особого критического расхода воды, фиксирующего пороговое физическое состояние – переход от преобладания процессов внутриобъемного к преобладанию процессов поверхностного стокообразования. Данная модель принципиально ориентирована на описание экстремальных паводковых событий. Структура модели проста, однако при этом включает в себя подвижные границы и динамические сильно нелинейные связи, что обеспечивает описание сложной динамики системы малого речного бассейна. Фазовый портрет данной системы представляет собой зависимости основных динамических переменных (емкостей и потоков) от расхода воды в замыкающем створе реки. Важнейшей особенностью модели является выделение в фазовом пространстве трех различных режимов стокообразования – внутриобъемного (бытового), поверхностного (первого сверхкритического, или экстремального) и «провального» (второго сверхкритического, или экстраординарного).

Третий режим является следствием теоретических положений модели. Его наблюдение крайне затруднено в силу редкости явления и катастрофического характера протекания. Особенностью «провального» режима стокообразования является систематический эффект бассейнового контррегулирования – явления, когда сток паводка по объему и максимальной интенсивности превышает аналогичные характеристики паводкообразующих осадков в сопоставимых пространственно-временных масштабах. Происходит это за счет быстрой мобилизации влагозапаса в речном бассейне, накопленного до начала паводкообразующего дождя [7].

Признание возможности эффекта контррегулирования имеет принципиальное значение для прогнозов гидрологических последствий климатических изменений, поскольку он указывает на возможность непропорциональных откликов гидрологической системы на атмосферные воздействия. ПЦ-модель верифицировалась и тестировалась на данных, полученных на более чем 120 бассейнах юга Дальнего Востока РФ, Тайваня и Австрии [8]. Везде, где тестируемые объекты и режимы соответствовали ограничениям модели, она демонстрировала хорошие результаты.

Выполнена регионализация FCM по данным стандартного гидрометеорологического мониторинга в южной части Дальнего Востока. С ее помощью для малых речных бассейнов получена оценка многолетней динамики основных генетических составляющих стока в теплый период года, а на основе анализа взаимосвязей водно-балансовых и физико-географических характеристик речных бассейнов выделены гидрологические районы ранга ландшафтно-гидрологических провинций [9].

На основе применения FCM группой ученых (д.г.н. Б.И. Гарцман, к.г.н. Т.С. Губарева, к.т.н. А.Н. Бугаец, к.г.н. М.А. Макагонова и Н.Д. Бугаец) при сотрудничестве с коллегами из ДВНИГМИ разработаны и внедрены в оперативную практику автоматизированные методы краткосрочных прогнозов стока в бассейнах Усури и Буреи [10].

Разработана и широко апробирована методика анализа структуры речных систем, основанная на современных стандартах (ESRI ArcGIS Spatial Analyst, Arc Hydro Tools) и оригинальных программных средствах обработки цифровых моделей рельефа. В результате получен принципиально новый для отечественной гидрологии инструментальный исследования сильно нелинейных процессов формирования экстремальных дождевых паводков [11, 12], а также динамики и эволюции речных систем [13, 14]. Разработана оригинальная методика выделения сети водоразделов и расчета их порядков, основанная на обработке цифровой модели рельефа (ЦМР) с использованием стандартного инструментария ГИС

ArcMap. Получены результаты в виде сопряженной порядковой классификации речных и водораздельных сетей, которые рационально интерпретируются и перспективны в исследованиях структуры, функционирования и эволюции речных систем [15].

К настоящему времени группой сотрудников ЛГиК, ЛМДГ и лаборатории биогеографии и экологии под руководством к.т.н. А.Н. Бугайца создан рабочий макет интегрированной системы гидрологического моделирования, основанной на использовании данных автоматизированной сети государственного гидрометеорологического мониторинга и оперативных прогностических данных синоптических моделей, а также на применении открытого европейского стандарта моделирования Open Modelling Interface (OpenMI). Основные блоки системы включают пространственно-распределенные характеристики водосбора, источники режимных данных и гидрометеорологические модели, необходимые для прогнозирования речного стока в режиме реального времени [16, 17].

К.г.н. Т.С. Губаревой на основе базовой модели одномерного стационарного однородного случайного процесса выполнено обобщение мирового опыта стохастического моделирования экстремальных гидрологических событий. На основе массовых данных наблюдений разработана технология сравнительного анализа адекватности использования разных типов законов распределения максимальных годовых расходов воды в регионах с различными физико-географическими условиями методом L-моментных оценок параметров [18]. Доказана возможность регионализации моделей вероятностного поведения паводковых серий, выявлено существование двух океанических и двух континентальных секторов, отчетливо различающихся по наиболее адекватным типам законов распределения и характеру взаимосвязей их параметров. По величинам параметров и по типам законов их распределения выделяются океанические (тихоокеанский и атлантический), а также континентальные секторы, в пределах которых выявлены определенные статистические закономерности (рис. 1) [19].

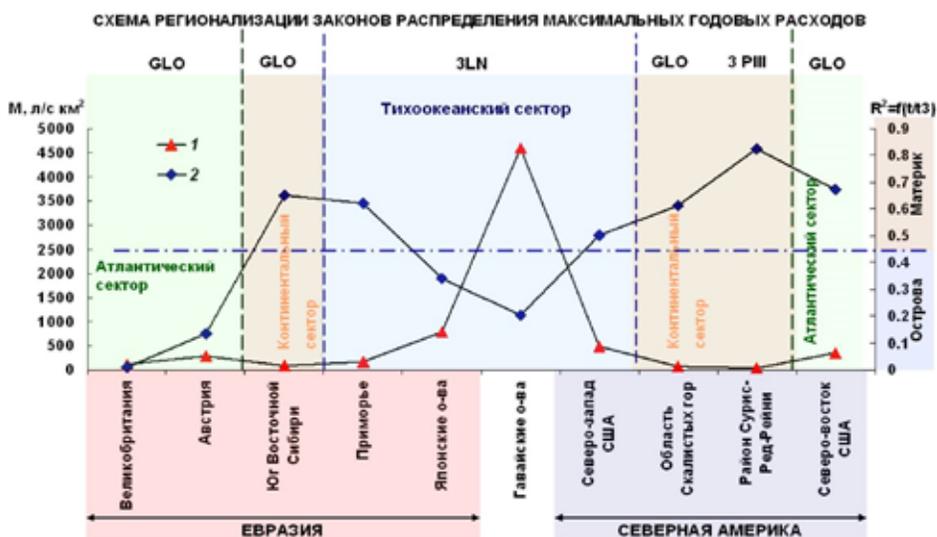


Рис. 1. Схема регионализации законов распределения и характеристик паводков в гумидном климате Северного полушария. Обозначения: (1) – средние из максимальных в году модулей стока рек, М, л/(с·км²); (2) – коэффициент детерминации связи выборочных L-вариации и L-асимметрии рядов наблюдений, R²; t – коэффициент L-вариации; t₃ – коэффициент L-асимметрии; GLO – обобщенное логистическое распределение; 3LN – трехпараметрическое логнормальное распределение; 3PIII – распределение Пирсона III типа

Fig. 1. Scheme of regionalization of the laws of distribution and characteristics of floods in the humid climate of the Northern Hemisphere

На региональном уровне разработана методика классификации и районирования речных бассейнов, реализованная на примере Японских островов, охваченных плотной государственной сетью гидрологических наблюдений [20]. Методика включает последовательное применение метода главных компонент, пошаговой регрессии, кластерного анализа и кривых Эндрюса. Полученная схема гидрологического районирования вполне закономерно оказалась очень близка к схемам тектонического строения островов: границы районов приурочены к границам тектонических структур с соблюдением их иерархии.

К.г.н. Т.С. Губаревой также разработаны теоретические основы нелокальной (многомерной) обеспеченности – принципиально новой вероятностной меры сложного события в пространственно-распределенных системах [21].

В 2011 г. при сотрудничестве с лабораторией геохимии ТИГ ДВО РАН и лабораторией лесных экосистем ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН был инициирован многолетний цикл натурных исследований на репрезентативных речных бассейнах, главная цель которых – получить новый эмпирический материал для верификации гидрологических моделей. При этом используются данные непродолжительных интенсивных высокотехнологичных гидрометеорологических и гидрохимических наблюдений высокого пространственно-временного разрешения, на основе которых с использованием статистической процедуры анализа смешения исходных компонентов (ЕММА) выполняется эмпирическое расчленение гидрографа стока на генетические составляющие. К настоящему времени освоена методология таких работ [22–24] и получены значимые результаты ее применения для малых рек континентальной Азии [25, 26].

На основе данных натурных наблюдений с помощью моделей SWAT (Soil and Water Assessment Tool), HBV, ECOMAG и ЕММА выполнены расчеты и сравнительный анализ генетической структуры стока двух малых экспериментальных речных бассейнов в истоках р. Уссури [27, 28]. Подготовлена обобщающая статья, которая имеется в открытом доступе [29].

Оценка гидрологических откликов на изменения климата

В последние годы в ЛГиК были получены значимые результаты применения оригинальных и адаптированных моделей и метода аналогов для оценки гидрологических откликов на климатические тенденции, дана характеристика некоторых экстремальных гидрологических событий последнего времени и в прошлом для территории Дальнего Востока.

На фоне современных глобальных гидрометеорологических тенденций в последние 30–40 лет в регионе отчетливо наблюдается рост амплитуды и частоты колебаний значений температуры воздуха и годовых сумм осадков и, как следствие, концентрация экстремальных гидрологических событий [6, 30–32]. В последние годы наблюдается группировка экстремальных гидрологических событий редкой, согласно истории наблюдений, повторяемости и весьма актуальным становится вопрос формировании новых климатических трендов. В ряду таких событий, кроме известного всем исторического наводнения на Амуре в 2013 г., находится экстремальный паводок в бассейне Зейского водохранилища 2007 г., чрезвычайно низкая водность Амура летом 2008 г., а также беспрецедентная высокая водность рек Приморья осенью 2012 г., когда на протяжении почти всей осени на реках сохранялся летний паводочный режим [30].

На основе ПЦ-модели к.г.н. С.Ю. Лупаковым и д.г.н. Б.И. Гарцманом отработаны методы решения задач сценарного прогнозирования гидрологического режима. В качестве объектов выбраны бассейны с хорошо откалиброванными параметрами, в качестве выходной характеристики гидрологического режима использовались кривые обеспеченности максимальных годовых расходов воды, а в качестве сценариев – данные метеостанций из разных районов Приморского края, на основе которых формировались потоки входных

данных. Иными словами, один и тот же бассейн как бы перемещается в различные климатические ситуации. Полученные результаты такого моделирования устойчивы и разумно интерпретируемы [32, 33]. На основании результатов вычислительных экспериментов были построены зависимости степени изменения нормы максимального годового расхода дождевого паводка и суммарного сезонного (июнь–сентябрь) стока от площади водосбора при разных изменениях средней суммы осадков за сезон. Результаты сценарного моделирования показывают достаточно сложную и неоднозначную картину в пределах водосбора р. Амур. В целом можно заключить, что с ростом сезонных осадков нормы максимальных дождевых расходов и суммарного за сезон слоя стока ускоренно растут, и их увеличение может значительно (до трех раз) превышать увеличение суммы осадков. Полученные результаты представляются вполне закономерными для рек с дальневосточным (преимущественно дождевым) типом режима.

Те же результаты показывают, что изменения коэффициента вариации во всех случаях остаются в пределах $\pm 5\%$, то есть не выходят за границы точности оценки этого параметра. Это позволяет сделать важный вывод, что при сценарном стохастическом моделировании формирования максимального стока в бассейне Амура в целом изменение гидрологического режима притоков может быть учтено с помощью только одного параметра – нормы. Этот результат коррелирует с аналогичным выводом, полученным в ЛГиК ранее при сплошном анализе фактических данных о максимальных расходах малых и средних рек юга Дальневосточного региона [6, 34].

Одна из полученных оценок гидрологических откликов на климат, выполненная к.г.н. М.А. Макагоновой [9], основана на способности любой гидрологической модели разделять сток на основные генетические составляющие, обычно – поверхностную, почвенно-грунтовую и подземную. Для оценки этих составляющих ряды длительных наблюдений были разбиты на два периода – от начала наблюдений до 1980 г. и с 1981 по конечный год наблюдений. В результате обработки массивов данных установлены три типа отклика малых речных бассейнов юга Дальнего Востока на колебания климата, выраженные изменениями соотношений между компонентами стока на фоне общих трендов. Для первого типа характерно общее повышение стока за счет увеличения водообмена с глубокими подземными горизонтами на фоне отсутствия многолетней тенденции роста осадков в теплый период. Второй тип отличается общим повышением стока на фоне тенденции увеличения осадков в теплый сезон года, возрастания доли стока поверхностного генезиса. Третий тип включает бассейны, для которых отмечено общее повышение стока, как поверхностного, так и подземного, на фоне тенденции увеличения осадков.

Аналоговый подход позволил д.г.н. В.В. Шамову проанализировать гидрологические последствия изменений климата в бассейне р. Амур по данным длительных гидрологических и гидрохимических наблюдений сети Росгидромета.

В конце XX в. регулярные наблюдения отразили факт резкого, в 2–6 раз, возрастания содержания растворенных форм железа в водах р. Амур и его притоков [35]. Кроме того, на фоне роста годовых величин атмосферных осадков на большей части бассейна в 1980–1990-х гг. наблюдались также значительные квазисинхронные колебания температуры почвогрунтов, при этом наиболее согласованным выглядел рост температуры на глубине 3.2 м в период с 1986 по 1989 г. (рис. 2).

Была обоснована гипотеза о том, что зафиксированный на реках системы Амура резкий скачок в содержании и стоке железа – «железный» паводок – произошел в результате направленной, климатически обусловленной деградации многолетней мерзлоты и высвобождения ранее законсервированных подвижных форм железа и миграции их в реки [35]. Помимо повышенной увлажненности, существенную роль здесь, очевидно, сыграла исключительная пространственная согласованность атмосферных и почвенных температурных трендов, которую можно связать прежде всего как с ритмами солнечной активности, так и с аэрозольными выбросами в результате извержений вулканов Эль-Чичон в 1982 г. и Пинатубо в 1991 г.

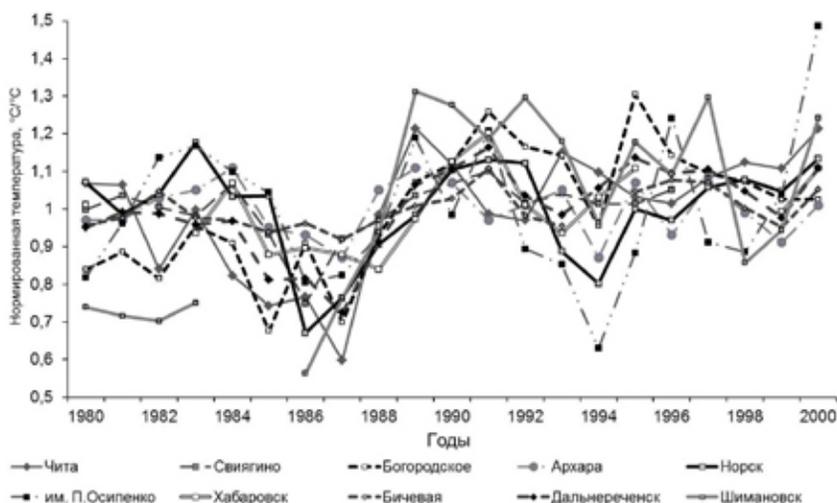


Рис. 2. Многолетняя динамика нормированной по среднему значению среднегодовой температуры почвы на глубине 3.2 м по данным 10 метеостанций РФ в бассейне Амура.

Fig. 2. Long-term dynamics of the average annual soil temperature normalized to the average value at a depth of 3.2 m according to the data of 10 meteorological stations of the Russian Federation in the Amur basin.

Заключение

Тематика гидрологических исследований в ТИГ в 1970–80-е гг. формировалась в соответствии с запросом к географической науке как на обоснование планов экономического развития, так и на рационализацию использования водных ресурсов и решение проблематики охраны окружающей среды. Характерной особенностью исследований был охват огромной территории, неизбежным следствием чего было использование несложных в расчетах и упрощенных параметров для оценки водообеспеченности территории. Для такого огромного региона, как Дальний Восток, были решены задачи подбора информативных характеристик, метода их расчета для неизученных территорий, типизации и районирования анализируемых водосборов по расчетным параметрам, картирования итоговых показателей и сравнительного анализа территорий различного уровня.

С 2000-х гг. исследования в области гидрологии проводятся в основном по инициативной тематике, при этом их результаты актуальны и востребованы. Они составили и составят в будущем новый методологический и технологический базис краткосрочного и долгосрочного гидрологического прогнозирования, качественной и количественной оценки водных ресурсов территории, их пространственно-временной изменчивости в условиях климатических изменений и хозяйственного преобразования ландшафтов.

Методы исследования процессов формирования экстремального стока и гидрологических откликов на климатические изменения следует развивать в нескольких дополняющих друг друга направлениях. Это прежде всего разработка и адаптация динамико-стохастических и стохастических моделей процессов формирования стока, широкое применение ЦМР и ДДЗ, методов палеореконструкции речной сети и структур речных бассейнов, а также методов ландшафтно-гидрологической аналогии с привлечением гео- и гидрохимических данных.

Необходимо подчеркнуть, что эффективность проводимых в ЛГиК и ЛМДГ исследований прямо связана с успешным сотрудничеством этих лабораторий с такими организациями, как Институт водных проблем РАН, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Дальневосточный научно-иссле-

довательский гидрометеорологический институт, ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Институт географии им. В.Б. Сочавы, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Северо-Восточный комплексный НИИ ДВО РАН и др.

Литература

1. Яковлева Л.М. Методические основы установления гидрологических характеристик для расчета допустимых нагрузок загрязнений на водотоки в условиях Дальнего Востока // Актуальные вопросы охраны природы на Дальнем Востоке. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1978. С. 78–82.
2. Яковлева Л.М. Исследование водно-ресурсных систем // Географические основы рационального природопользования. М.: Наука, 1987. С. 135–141.
3. Яковлева Л.М. Классификация речных бассейнов Приморского края для оценки водноресурсного потенциала территории // География и природные ресурсы. 1982. № 1. С. 76–82.
4. Яковлева Л.М. Географические основы прогнозирования водохозяйственных ситуаций на Дальнем Востоке // География и природные ресурсы. 1986. № 3. С. 22–26.
5. Яковлева Л.М., На Юн За Ю.Б. Территориальная оценка водноресурсного потенциала. Разноуровневый анализ. Владивосток: Дальнаука. 1999. 121 с.
6. Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с.
7. Гарцман Б.И. Эффект бассейнового контррегулирования при формировании экстремальных паводков // География и природные ресурсы. 2007. № 1. С. 14–21.
8. Gartsman B.I. Chapter 3. Flood Cycle Model – new approach for extraordinary floods prediction // Horizons in Earth Science Research. Vol. 9 / V. Veress and J. Szigethy eds. N.Y. Nova Science Publishers Inc. 2013. P. 105–136.
9. Макагонова М.А. Динамика параметров водообмена малых речных бассейнов в области восточноазиатского муссона // География и природные ресурсы. 2009. № 2. С. 139–145.
10. Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Бугаец А.Н., Макагонова М.А. Краткосрочный прогноз притока воды в водохранилище Бурейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2009. № 1. С. 11–20.
11. Lee K.T., Chen N.-C., Gartsman B.I. Impact of stream network structure on the transition break of peak flows // Journal of Hydrology. 2009. Vol. 367, iss. 3–4. P. 283–292.
12. Chen N.-C., Lee K.T., Gartsman B.I. Relationship between Peak Discharge and Watershed Area in the Nested Watershed // Journal of Taiwan Water Conservancy. 2008. Vol. 56, N. 4. P. 28–39. (на кит. яз.)
13. Гарцман Б.И., Галанин А.А. Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты // География и природные ресурсы. 2011. № 3. С. 27–37.
14. Гарцман Б.И., Шекман Е.А., Ли К.Т. Порядковая классификация речных водоразделов на основе обработки цифровых моделей рельефа // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 164–173.
15. Гарцман Б.И., Шекман Е.А. Возможности моделирования речной сети на основе ГИС-инструментария и цифровой модели рельефа // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 86–98.
16. Бугаец А.Н. Применение стандарта OpenMI для создания интегрированных систем гидрологического моделирования // Метеорология и гидрология. 2014. № 7. С. 93–105.
17. Бугаец А.Н., Гончуков Л.В., Соколов О.В., Гарцман Б.И., Краснопеев С.М. Автоматизированная информационная система гидрологического мониторинга и управления данными // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 103–113.
18. Губарева Т.С., Гарцман Б.И. Оценка параметров распределений экстремальных гидрологических величин методом L-моментов // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 4. С. 1–10.
19. Губарева Т.С. Пространственные закономерности распределения паводков рек умеренного пояса Северного полушария // Известия РАН. Серия геогр. 2011. № 2. С. 65–77.
20. Губарева Т.С. Классификация речных бассейнов и гидрологическое районирование (на примере Японии) // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 111–121.
21. Gubareva T.S. Types of probability distributions in the evaluation of extreme floods // Water Resources. 2011. Vol. 38, N 7. P. 962–971.
22. Гарцман Б.И., Шапов В.В. Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 6. С. 589–599.
23. Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Шапов В.В. Анализ природных трассеров и генетических составляющих стока в моделях смешения (на примере малых бассейнов в Приморье) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 4. С. 387–399.
24. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Солопов Н.В. Модель смешения четырех источников питания речного стока с использованием гидрохимических трассеров в задаче разделения гидрографа // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 6. С. 583–595.
25. Кичигина Н.В., Губарева Т.С., Шапов В.В., Гарцман Б.И. Трассерные исследования формирования речного стока в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. 2016. № 55. С. 60–69.

26. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Василенко Н.Г. Источники формирования речного стока в зоне многолетней мерзлоты: оценка методами трассерной гидрологии по данным режимных гидрохимических наблюдений // Криосфера Земли. 2018. Т. 22, № 1. С. 32–43.
27. Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Pshenichnikova N.F., Tereshkina A.A. Modeling the hydrological regime of small testbed catchments based on field observations: a case study of the Pravaya Sokolovka river, the upper Ussuri river basin // *Water Resources*. 2019. Vol. 46, N S2. P. S8-S16.
28. Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н., Шамо В.В. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов // *Водные ресурсы*. 2021. Т. 48, № 4. С. 417–426.
29. Bugaets A., Gartsman B., Gubareva T., Lupakov S., Kalugin A., Shamov V., and Gonchukov L. Comparing the runoff decompositions of small testbed catchments: end-member mixing analysis against hydrological modelling // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2021. [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2021-626>.
30. Гарцман Б.И., Мезенцева Л.И., Меновщикова Т.С., Попова Н.Ю., Соколов О.В. Условия формирования экстремально высокой водности рек Приморья в осенне-зимний период 2012 г. // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 4. С. 77–92.
31. Шамо В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Макагонова М.А. Исследования гидрологических последствий современных изменений климата в Дальневосточном регионе России // *Вестн. ДВО РАН*. 2014. № 2 (174). С. 15–23.
32. Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю. Влияние изменений климата на максимальный сток в бассейне Амура: оценка на основе динамико-стохастического моделирования // *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44, № 5. С. 532–542.
33. Лупаков С.Ю. Паводковый сток на реках Приморья в условиях меняющегося климата: моделирование, методы, результаты // *Вестн. ДВО РАН*. 2019. № 2 (204). С. 125–132.
34. Губарева Т.С. Максимальный сток рек в бассейне Амура. Закономерности формирования и методы расчетов. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH @ Co.KG, 2011. 131 с.
35. Шамо В.В., Ониси Т., Кулаков В.В. Сток растворенного железа в реках бассейна Амура в конце XX века // *Водные ресурсы*. 2014. Т. 41, № 2. С. 206–215.

References

1. Yakovleva, L.M. Methodical bases for establishing hydrological characteristics for calculating permissible pollution loads on watercourses in the conditions of the Far East. In *Topical issues of nature protection in the Far East*. FESC of Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1978. 78-82. (In Russian)
2. Yakovleva, L.M. Research of water resource systems. In *Geographical bases of rational nature management*. Nauka: Moscow, Russia, 1987, 135-141 (In Russian)
3. Yakovleva, L.M. Classification of the river basins of Primorsky Krai to assess the water resource potential of the territory. *Geography and nature resources*. 1982, 1, 76-82 (In Russian)
4. Yakovleva, L.M. Geographical basis for forecasting water management situations in the Far East. *Geography and nature resources*. 1986, 3, 22-26. (In Russian)
5. Yakovleva, L.M. Territorial assessment of water resource potential. Multi-level analysis. Dalnauka: Vladivostok, Russia, 1999; 121 p. (In Russian)
6. Gartsman, B.I. Rain floods on rivers of the south of Far East: methods of calculation, forecasts, risk assessments. Dalnauka: Vladivostok, Russia, 223 p. (In Russian)
7. Gartsman, B.I. The effect of basin counter-regulation on formation of extreme rain-induced floods. *Geography and nature resources*. 2007, 1, 14-21. (In Russian)
8. Gartsman, B.I. Chapter 3. Flood Cycle Model – new approach for extraordinary floods prediction. *Horizons in Earth Science Research*. Nova Science Publishers Inc. 2013, 9, 105–136.
9. Makagonova, M.A. The dynamics of water exchange parameters of small river basins in the regions of the east Asian monsoon. *Geography and Natural Resources*. 2009, 30(2), 199-203. (In Russian)
10. Gartsman, B.I.; Gubareva, T.S.; Bugaets, A.N.; Makagonova, M.A. Short-term forecast of water inflow to the Bureyskaya Hydropower station reservoir. *Power Technology and Engineering*. 2009, 1, 11-20. (In Russian)
11. Lee, K.T.; Chen, N.-C.; Gartsman, B.I. Impact of stream network structure on the transition break of peak flows. *Journal of Hydrology*. 2009, 367(3–4), 283–292.
12. Chen, N.-C.; Lee, K.T.; Gartsman, B.I. Relationship between Peak Discharge and Watershed Area in the Nested Watershed. *Journal of Taiwan Water Conservancy*. 2008, 56(4), 28-39. (in Chinese)
13. Gartsman, B.I.; Galanin, A.A. Structural-hydrological and morphometric analysis of river systems: theoretical aspects. *Geography and Natural Resources*. 2011, 32(3), 226-234.
14. Gartsman, B.I.; Shekman, E.A.; Lee, K.T. Order classification of river watersheds based on processing digital elevation models. *Geography and Natural Resources*. 2016, 37(4), 362-370.
15. Gartsman, B.I.; Shekman, E.A. Potential of river network modeling based on GIS technologies and digital elevation model. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016, 41(1), 63-71.
16. Bugaets, A.N. Using the OPENMI standard for developing integrated systems of hydrological modeling. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2014, 39(7), 498-506.

17. Bugaets, A.N.; Gonchukov, L.V.; Sokolov, O.V.; Gartsman, B.I.; Krasnopee, S.M. Automated information system for hydrological monitoring and data management. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2017, 3, 103–113. (In Russian)
18. Gubareva, T.S.; Gartsman, B.I. Estimating distribution parameters of extreme hydrometeorological characteristics by L-moments method. *Water Resources*. 2010, 37(4), 437–445.
19. Gubareva, T.S. Spatial patterns of the river floods distribution in the temperate zone of the Northern Hemisphere. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2011, 2, 65–77. (In Russian)
20. Gubareva, T.S. Classification of the river basins and hydrological regionalization (as exemplified by Japan). *Geography and Natural Resources*. 2012, 33(1), 74–82.
21. Gubareva, T.S. Types of probability distributions in the evaluation of extreme floods. *Water Resources*. 2011, 38(7), 962–971.
22. Gartsman, B.I.; Shamov, V.V. Field studies of runoff formation in the Far East region based on modern observational instruments. *Water Resources*. 2015, 42(6), 766–775.
23. Gubareva, T.S.; Boldeskul, A.G.; Gartsman, B.I.; Shamov, V.V. Analysis of natural traces and genetic runoff components in mixing models: case study of small basin in Primorye *Water Resources*. 2016, 43(4), 629–639.
24. Gubareva, T.S.; Gartsman, B.I.; Solopov, N.V. A model of mixing of four river runoff recharge sources using hydrochemical traces in the problem of hydrograph separation. *Water Resources*. 2018, 45(6), 583–595.
25. Kichigina, N.V.; Gubareva, T.S.; Shamov, V.V.; Gartsman, B.I. Tracer investigations into the runoff formation within the Lake Baikal drainage basin. *Geography and Natural Resources*. 2016, S5, 60–69. (In Russian)
26. Gubareva, T.S.; Gartsman, B.I.; Vasilenko, N.G. Sources of river flow formation in the zone of permafrost: estimation by the methods of tracer hydrology according to the data of regime hydrochemical observation. *Earth's Cryosphere*. 2018, 22(1), 32–43. (In Russian)
27. Bugaets, A.N.; Gartsman, B.I.; Gonchukov, L.V.; Lupakov, S.Y.; Shamov, V.V.; Pshenichnikova, N.F.; Tereshkina, A.A. Modeling the hydrological regime of small testbed catchments based on field observations: a case study of the Pravaya Sokolovka river, the upper Ussuri river basin. *Water Resources*. 2019, 46(S2), S8–S16.
28. Lupakov, S.Y.; Bugaets, A.N.; Shamov, V.V. Application of different structures of HBV model to studying runoff formation processes: case study of experimental catchments. *Water Resources*. 2021, 48(4), 512–520.
29. Bugaets, A.; Gartsman, B.; Gubareva, T.; Lupakov, S.; Kalugin, A.; Shamov, V.; Gonchukov, L. Comparing the runoff decompositions of small testbed catchments: end-member mixing analysis against hydrological modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*. 2021. [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2021-626>.
30. Gartsman, B.I.; Mezentsseva, L.I.; Popova, N.Y.; Sokolov, O.V.; Menovshchikova, T.S. Conditions of generation of extremely high water content of Primorye rivers in autumn-winter 2012. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2014, 39(4), 260–270.
31. Shamov, V.V.; Gartsman, B.I.; Gubareva, T.S.; Makagonova, M.A. Studies of hydrological response to current climate change at the Russian Far East. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2014, 2(174), 15–23. (In Russian)
32. Gartsman, B.I.; Lupakov, S.Y. Effect of climate changes on the maximal runoff in the Amur basin: estimation based on dynamic-stochastic simulation. *Water Resources*. 2017, 44(5), 697–706.
33. Lupakov, S.Yu. Flood flow of Primorye rivers under the climate changes conditions: modeling, methods, results. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2019, 2(204), 125–132. (In Russian)
34. Gubareva, T.S. The maximum flow of rivers in the Amur basin. Regularities of formation and calculation methods. LAP Lambert Academic Publishing GmbH @ Co.KG: Saarbrücken, 2011; 131 p. (In Russian)
35. Shamov, V.V.; Onishi, T.; Kulakov, V.V. Dissolved iron runoff in Amur basin rivers in the late XX century. *Water Resources*. 2014, 41(2), 201–209.

Статья поступила в редакцию 18.04.2022; одобрена после рецензирования 02.06.2022; принята к публикации 24.06.2022.

The article was submitted 18.04.2022; approved after reviewing 02.06.2022; accepted for publication 24.06.2022.

