

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.5

КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЙОНИРОВАНИЕ РЕК ПО ВОДНОМУ РЕЖИМУ: ИСТОРИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ¹

© 2021 г. Н. Л. Фролова^а, *, Е. С. Повалишникова^а, М. Б. Киреева^а

^аМГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет,
Москва, 119991 Россия

*e-mail: frolova_nl@mail.ru

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

После доработки 20.05.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Из всех гидрологических характеристик показателям водного режима рек всегда уделялось особое внимание как интегральным параметрам гидрологического состояния водного объекта из-за возможности использования в различных расчетных и прогнозных методиках. В работе прослеживается развитие в России и за рубежом различных теорий и подходов к районированию территорий по особенностям водного режима рек. Эволюция классификаций, созданных к концу XX в., отражает изменение изученности бассейнов рек, накопление знаний об условиях формирования стока. Показано, что создание специализированных баз данных, содержащих информацию о характеристиках климата и стока рек, тематических электронных ГИС-проектов и карт предопределило развитие современных количественных методов. Учет большого объема привлекаемой гидрометеорологической информации, автоматизация средств обработки и интерпретации информации о характеристиках речного стока, программные комплексы, реализующие базы данных и геоинформационные технологии, веб-приложения дали возможность перейти от общегеографических, описательных классификаций и районирования к количественным, построенным на основе строгих расчетов параметров стока и на разработке новых критериев, характеризующих актуальные для различных отраслей экономики особенности формирования водного режима рек.

Ключевые слова: водный режим, районирование, классификации, базы данных, картирование, автоматизация обработки, ГИС-технологии.

DOI: 10.31857/S032105962102005X

ВВЕДЕНИЕ

Водный режим представляет собой совокупность закономерно повторяющихся изменений состояния водного объекта, присущих ему и отличающих его от других [14], как результат преобладающих типов питания, влияния географического положения и климата. Настоящая работа посвящена особенностям водного режима рек в различных физико-географических условиях.

Неоднородность климатических и ландшафтных условий крупных территорий послужила толчком для различных подходов к их районированию по признакам сходства и различия в условиях формирования стока рек и их водного режима.

Изучение географических закономерностей изменения водного режима рек и водоемов под влиянием природных факторов и активно развивающейся хозяйственной деятельности человека

необходимо для разработки более совершенных, чем существующие, методов гидрологических расчетов и прогнозов. Актуальность данного исследования связана также с наблюдающимися климатическими изменениями и с вызванной ими трансформацией водного режима. Кроме того, устаревание имеющихся карт водного режима и гидрологического районирования, внедрение новых методов и технологий анализа обуславливают необходимость обновления полученных ранее результатов.

Цель данной статьи – критический анализ основных этапов изучения водного режима рек, эволюции классификаций и схем районирования с учетом накопленных научных знаний, обобщение сведений по трансформации водного режима рек разных регионов Земного шара, по современным классификациям и районированию, направлениям дальнейших исследований.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 19-15-50621–Экспансия).

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИЙ И СХЕМ РАЙОНИРОВАНИЯ В РОССИИ

Первые попытки природного районирования территорий по водному режиму рек относятся к концу XIX–началу XX вв., которое имеет три направления: 1) почвенно-ботаническое; 2) физико-географическое (ландшафтное) и, частично, климатическое; 3) сельскохозяйственное. К основополагающим работам первого и второго направлений в начале XX в. относятся климатические классификации [5, 24, 27, 35, 41], труды В.Н. Сукачева [39], в которых впервые упоминается роль хозяйственной деятельности в формировании водного режима рек. Значительный вклад в развитие ландшафтного районирования внесли Л.С. Берг [4], М.А. Первухин [33] и А.А. Григорьев [15], положивший начало климатическим моделям районирования как первопричине формирования стока, впоследствии получившим широкое развитие в работах М.И. Будыко [16].

Собственно гидрологическое районирование впервые предпринято А.И. Воейковым. В 1884 г. он предложил классификацию рек мира, основанную на утверждении “река – продукт климата”. А.И. Воейков выделил три типа рек по преобладающему питанию и девять подтипов, учитывающих орографию и водный режим [10]. В 1925 г. В.П. Семенов-Тян-Шанский предложил наряду с физико-географическими и климатическими аспектами учитывать водность рек [36, 37]. Классификации были сугубо качественные и описательные. Дальнейшее деление на группы проводилось с учетом различий водности отдельных фаз гидрологического режима рек.

К середине XX в. появились еще четыре классификации водного режима: Л.К. Давыдова (1933 г.) [17], М.И. Львовича (1938 г.) [30], Б.Д. Зайкова (1946 г.) [21] и В.А. Троицкого (1948 г.) [40]. Классификация В.А. Троицкого была сугубо климатической. В основу классификации Б.Д. Зайкова легло внутригодовое распределение стока, условия питания рек он не рассматривал. Тем не менее выделение десяти типов водного режима позволило ему дать очень полную характеристику гидрологического режима рек СССР. В 1952 г. появилась классификация Д.Л. Соколовского по внутригодовому распределению стока рек, представляющая собой упрощенный вариант классификации Зайкова. В 1955 г. Л.К. Давыдовым было выполнено районирование территории СССР по бассейнам морей и крупным речным водосборам. В результате им были выделены 15 гидрографических районов. В классификации не учитывалось многообразие режима средних и малых рек.

Основное уязвимое место любой качественной классификации, очевидно, заключается в субъективном выборе границ различных групп объектов. В классификации М.И. Львовича впервые предложены количественные критерии выделения типов питания рек (<50, 50–80, >80%). Им получена матрица из 144 вариантов, 38 из которых наблюдались на реках мира, а 20 – на территории СССР [29].

С первой половины XX в. стали применяться гидрологические характеристики, дающие косвенные представления о величине стока. На их основе строились карты сезонного стока, выделялись районы со сходными условиями формирования водного режима [13, 25]. По классификации В.И. Астраханцева территория делится по “зонам водности” на основе значения модуля стока [2]. В середине XX в. советскими гидрологами активно изучалась проблема минимального стока рек [6, 7].

В 1960 г. П.С. Кузин совместил в своей классификации все основные аспекты формирования стока: разделил реки на большие, средние и малые, рассмотрел аспекты географического ландшафта, типы питания рек, основные гидрологические сезоны и фазы водного режима. В результате им выделено 3 типа и 14 подтипов водного режима рек для равнинных и горных территорий различных климатических зон [26].

Морфогенетический подход к описанию водных режимов – устойчивая традиция в отечественной гидрологии – взят за основу при составлении Карты водного режима рек России, разработанной сотрудниками кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова В.М. Евстигнеевым и Н.В. Шенберг [9]. В классификации показаны особенности водного режима крупных речных систем в зависимости от направления течения, типа и вида охватываемых ими природных зон и географических регионов.

В 2011 г. классификация М.И. Львовича была дополнена 20 новыми типами водного режима рек мира для регионов, по которым у него не имелось фактических данных [28]. Кроме того, автором проведена оценка устойчивости типизации сезонной структуры стока рек в разных природных условиях.

В Национальном Атласе России [32] представлены карты типов водных режимов, годового стока и стока рек по типам питания, совместный анализ которых позволяет дать достаточно полную характеристику водного режима рек России, основанную на предшествующих исследованиях в этой области.

ЗАРУБЕЖНЫЕ КЛАССИФИКАЦИИ РЕК ПО ВОДНОМУ РЕЖИМУ

Классификации водного режима рек мира активно развивались с середины XX в., что в некоторой степени основывалось на анализе российских и советских классификаций. Одной из первых, сочетавших физико-географический и гидрологический аспекты формирования стока, можно считать классификацию Парде, который в 1955 г. выделил три типа режима рек: простой, смешанный и сложный [84]. Каждый из них делился на подтипы (гляциальный, нивальный, плювиальный) и их переходные формы, исходя из высотного положения бассейнов, качественного описания внутригодового распределения стока и введенных диапазонов изменения амплитуды, модуля и коэффициента стока.

Еще одной крупной зарубежной гидрологической классификацией можно считать карту внутригодового стока рек Института географии Бернского университета [48]. Три выделенных типа гидрологического режима делились на 16 подтипов по средней высоте бассейна, площади его оледенения и статистическим характеристикам. По результатам исследований создан гидрологический атлас [66].

В 1906 г. в Канаде был издан атлас природных ресурсов страны, который к концу XX в. трансформировался в Интернет-источник по всем природным ресурсам Канады, включая водные [85]. Здесь можно найти районирование Канады по основным климатическим и гидрологическим характеристикам, карты среднего многолетнего, сезонного и внутригодового распределения стока рек.

Со второй половины XX в. с развитием национальных сетей гидрологических постов развиваются классификации, основанные на измеренных и рассчитанных количественных параметрах стока. Это несколько десятков характеристик, встречающихся в разных сочетаниях в современных классификациях в исходном виде и после статистической обработки (например, методами кластеризации, с помощью различных регрессионных моделей, алгоритмов машинного обучения и др.).

Так, в 1989 г. в США была опубликована статья об изменчивости стока и региональном анализе типов водотоков [93]. В ней проанализированы многолетние наблюдения по 78 водотокам в континентальной части страны. Для каждой реки получены 11 наборов статистических данных и выявлены 9 типов водного режима: прерывистый пересыхающий; прерывистый изменчивый; прерывистый; постоянный изменчивый; постоянный; реки со снеговым, смешанным снежно-дождевым, дождевым зимним, преимущественно подземным питанием.

В 1988 г. в Мельбурне появилась глобальная классификация режимов рек [60], выполненная по сезонному распределению водности 969 водных объектов на основе кластерного анализа среднемесячного стока, выраженного в процентах. Авторами составлена карта типов водного режима рек. По той же базе данных предложена глобальная классификация рек, в рамках которой на карте мира выделено 15 гидрологических районов [65]. Ее основной недостаток – ограниченность данных, которая компенсировалась подбором климатических характеристик выделенных районов.

В последние 20 лет развернулись широкомащтабные исследования режима рек на всех материках Земного шара. Научные публикации, представляющие различного рода типизации и классификации гидрологического режима рек, опубликованы по различным районам Европы [53, 62, 72, 78, 82], США [74, 81, 95, 96], Канады [46], Австралии [69, 75], Эфиопии [51] и др.

В статье [69] представлена первая классификация типов водного режима, разработанная для всего австралийского континента. Она составлена на основе 120 критериев, описывающих экологически важные характеристики естественного гидрологического режима на 830 постах, и включает 12 типов водного режима, различающихся сезонным распределением стока, колебаниями величины и частоты наводнений, стабильным и нестабильным базисным, летним и зимним стоком и др.

Классификация рек Средиземноморья по климатически обусловленным типам проведена в [91] на основе анализа многолетних данных 60 постов по всему Средиземноморскому бассейну.

В начале 2000-х гг. по 35 речным бассейнам Великобритании предложена классификация рек по внутригодовой изменчивости стока и новый индекс чувствительности для оценки отклика речного стока на климатические изменения [54, 103]. Этот индекс определяет тесноту и вид связи между климатическими классификациями и типами водного режима рек, что особенно актуально для районов с недостаточной гидрологической изученностью.

Вслед за региональными классификациями стали появляться классификации для крупных регионов и материков, а также теоретические исследования, нацеленные на разработку глобальных классификаций режима рек мира. В [58] для определения географических различий сезонной изменчивости стока рек использованы ряды среднемесячных расходов по 1345 постам по всему миру. Авторами отмечена наибольшая межгодовая изменчивость стока, превышающая колебания осадков, в засушливых регионах (Юго-Запад США, Мексика, Сахель). Наиболее устойчивый

сток отмечен на реках тропической зоны. Прослежены связи временных колебаний стока рек некоторых частей Америки, Европы и Австралии с явлением Эль-Ниньо; влияние климата Северной части Тихого океана на режим рек западного побережья Северной Америки и тропического пояса, климатических колебаний над Атлантикой на режим рек восточного побережья США, тропических районов Южной Америки и Европы.

В статье [80] обобщены характеристики стока по данным наблюдений на 1221 реке с естественным режимом по всему миру. Рассмотрены средние значения, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, тип распределения и обеспеченность стока. Исследованы продолжительность, величина и выраженность минимальных расходов.

В статье [88] приведен анализ методологий гидрологических классификаций и их применения в гидроэкологии. В [98] проведено сравнение шести дедуктивных и индуктивных классификаций режимов рек Новой Зеландии, выполненных на общей базе исходных данных. В качестве предикторов использовано около 30 характеристик стока, полученных на реках по всей стране. В одних классификациях данные подвергались кластерному анализу, в других — обрабатывались классификатором машинного обучения “Random Forest”, применяемым для задач классификации, регрессии и кластеризации. Авторами сделан вывод о плохой сходимости результатов между собой и о наиболее корректной работе классификаций, основанных на индуктивном подходе.

Одна из последних — глобальная классификация рек мира GloRiC, предложенная канадскими исследователями [56, 64]. Главная цель GloRiC — разработка схемы основных критериев, используемых в классификации, и определение общего набора характеристик режима рек, которые могут быть использованы для составления глобальных и региональных шкал классификаций разной детальности. Структура GloRiC определена на основе систематизации 60 классификаций разного пространственного масштаба, объединивших 633 абиотических и биотических переменных классификатора. Выбор переменных, на основе которых разрабатывались три базовые подклассификации GloRiC, а также определение количества классов и их граничных значений проводилось на основе статистической обработки данных и экспертного мнения исследователей. Концептуальную основу GloRiC составили пять категорий переменных: гидрологическая, физико-климатическая, русловых процессов, гидрохимическая и гидробиологическая, — позволившие дать комплексную характеристику состояния реки. В итоге все наиболее крупные и значимые речные системы мира объединены в 127 групп.

Таким образом, эволюция классификаций рек по водному режиму, созданных к концу XX в. и в начале XXI в., отражает степень гидрометрической и гидролого-климатической изученности бассейнов рек, накопление научных знаний об условиях формирования стока. Значительное увеличение потребления водных ресурсов во всех сферах мировой экономики и зависимость экономического развития от количества доступных и возобновляемых водных ресурсов определили потребность в переходе описательных классификаций и районирования к построенным на основе расчетов параметров стока.

СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В КЛАССИФИКАЦИЯХ И РАЙОНИРОВАНИИ

Современные изменения климата и окружающей среды проявляются на всех континентах в разнонаправленных тенденциях, что так или иначе приводит к трансформации гидрологического режима рек, отмеченной учеными во всем мире. Данная статья касается результатов исследований только для европейского континента, включая территорию России.

Одна из последних для территории Европы — обобщающая работа [53], в которой участвовали авторы статьи. Впервые на континентальном уровне выявлены региональные различия изменений характеристик максимального стока. Результаты показывают следующее: (1) увеличение количества осадков осенью и зимой привело к росту максимальных расходов воды в северо-западной Европе; (2) сокращение осадков и увеличение испарения в Южной Европе привели к уменьшению расходов средних и крупных водосборов; (3) уменьшение запасов воды в снежном покрове вследствие зимних оттепелей привело к уменьшению максимальных расходов воды в Восточной Европе. Региональные тенденции изменения характеристик максимальных расходов воды в Европе за десятилетие находятся в диапазоне от +11.4 до –23.1%.

Некоторые аспекты изменения характеристик водного режима рек Европы рассмотрены в работах [52, 78, 92, 94]. На реках с преобладающим весенним стоком, сходных по режиму с реками на севере и в средней полосе ЕЧР, отмечено увеличение стока в осенне-зимний период, связанное с дождями и оттепелями, и сокращение стока весеннего половодья, что также подтверждается исследованиями [99, 101]. В высокогорных бассейнах Европы отмечено уменьшение летнего стока, вызванное сокращением площадей ледников, оттаиванием вечной мерзлоты и, как следствие, увеличением фильтрационной способности грунтов [79, 97]. Произошло смещение дат весеннего

половодья, для >25% рассмотренных рек его пик сдвинулся с июня на май, возросла его продолжительность. На реках с преобладающим дождевым питанием (Атлантическое побережье) отмечено увеличение годового стока, что вполне согласуется с возросшей величиной осадков в последние десятилетия. В бассейне Эльбы и Одера повторяемость высоких зимних паводков сократилась, что, по мнению авторов, связано с более мягкими зимами, а летних — осталась без изменений [83]. Масштабные исследования гидрологического режима более 90 рек Польши позволили выделить 8 групп рек, различающихся по степени трансформации их многолетнего стока [104], и выявить многолетние периоды его изменений: 1950–1960-е, 1970–1980-е, 1990–2010-е гг., причем для разных групп рек колебания стока в эти периоды имели противоположно направленные тенденции. По степени трансформации сезонного стока выделено 5 групп рек.

Минимальный сток на реках Центральной Европы, по данным наблюдений, с конца XIX в. до 1980-х гг. несколько увеличился [87]. Климатически обусловленный рост меженного стока связан с увеличением количества и интенсивности кратковременных летних осадков. К не климатическому фактору относится изменение управления водными ресурсами (регулирование и переброски стока из других бассейнов, использование подземных вод и их последующий сброс в речную сеть). Если говорить о климатически обусловленных изменениях летнего меженного стока в бассейне Дуная в последние десятилетия, то вследствие сокращения летних осадков и повышения температуры воздуха наметилась тенденция его уменьшения, которая будет сохраняться в будущем согласно прогнозам, составленным по существующим климатическим моделям. Наибольшим внутригодовым трансформациям подвергнется режим рек южных, более сухих районов Европы [87], где обострится проблема летнего водообеспечения населения. Эти выводы хорошо согласуются с результатами исследований стока рек ЕЧР авторами статьи [38].

Результаты изучения водного режима рек Белоруссии подтверждают тенденцию роста расходов зимних паводков на реках Центральной России и ее северо-западной части. Выявлено статистически значимое увеличение максимальных зимних расходов воды на десяти из 30-ти исследованных реках, что связано с возрастанием роли западного типа циркуляции атмосферы [11]. Рост максимальных расходов воды на большинстве рек Белоруссии составляет ~10%, лишь на реках Полесья максимальные расходы зимних паводков возрастают на 20–40%.

В качестве обобщающего параметра, характеризующего изменение гидрологического режима

рек ЕЧР, предложен коэффициент трансформации стока на основе четырех наиболее репрезентативных параметров: годового, максимального, базисного и сезонного стока. Методика его расчета изложена в [43]. Наиболее измененным с 1945–1977 гг. оказался водный режим рек бассейнов Оки, Дона, Верхнего Урала, левобережья среднего течения Волги.

Суммируя результаты проведенного анализа, можно сделать следующие выводы:

Доля весеннего стока как основного гидрологического сезона сохранилась в бассейнах северных рек и резко сократилась в бассейнах рек лесостепной и степной зон, а также рек, берущих начало на Среднерусской возвышенности. Это верховья Дона (с 54 до 45 мм), Оки (с 95 до 83 мм), Северского Донца, притоки Средней и Нижней Волги (до 50% стока). Некоторое сокращение весеннего стока отмечено в верховьях бассейна Камы. Напротив, севернее 58°–60° с.ш. наблюдается общая тенденция его роста (до 20–50% по отдельным бассейнам) [70]. Наибольший рост максимальных расходов воды приурочен к бассейну Свири, верховьям Сухоны, левобережным притокам Верхней Волги и верховьям Урала [1].

Наибольшим изменениям подвергся меженный сток. Значимые тренды увеличения летнего меженного стока после 1980 г. отмечены во всей лесостепной и степной зоне ЕЧР. В верховьях бассейна он возрос в среднем с 16 до 28 мм [3, 38]. Повсеместно, на 95% проанализированных постов, отмечен рост зимнего меженного стока. Для 82% постов рек бассейнов Дона и Волги это изменение оказалось значимым [44, 70]. Доли летнего и зимнего меженного стока увеличиваются в бассейнах всех рек лесной и лесостепной зоны в пределах 50°–60° с.ш.

Среднегодовой и базисный сток имеют тенденции к повсеместному увеличению с разной степенью выраженности этого процесса [38].

Наименьшая трансформация водного режима произошла в бассейнах северных рек (Онеги, Северной Двины, Мезени и Печоры), а также в левобережных притоках Верхней Волги, в бассейне Вятки и Верхней Камы. Она незначительно выражена в левобережных притоках Средней Камы и на Нижней Волге. Наибольшей трансформации подвергся сток бассейнов Оки, Дона и Средней Волги (рис. 1).

В целом, обобщая отмеченные выше особенности современной трансформации гидрологического режима рек, можно сказать, что разнонаправленные тенденции изменения температуры воздуха и количества выпадающих осадков в различных климатических регионах Европы привели к столько же разнонаправленному, но повсеместному изменению гидрологического режима рек континента.

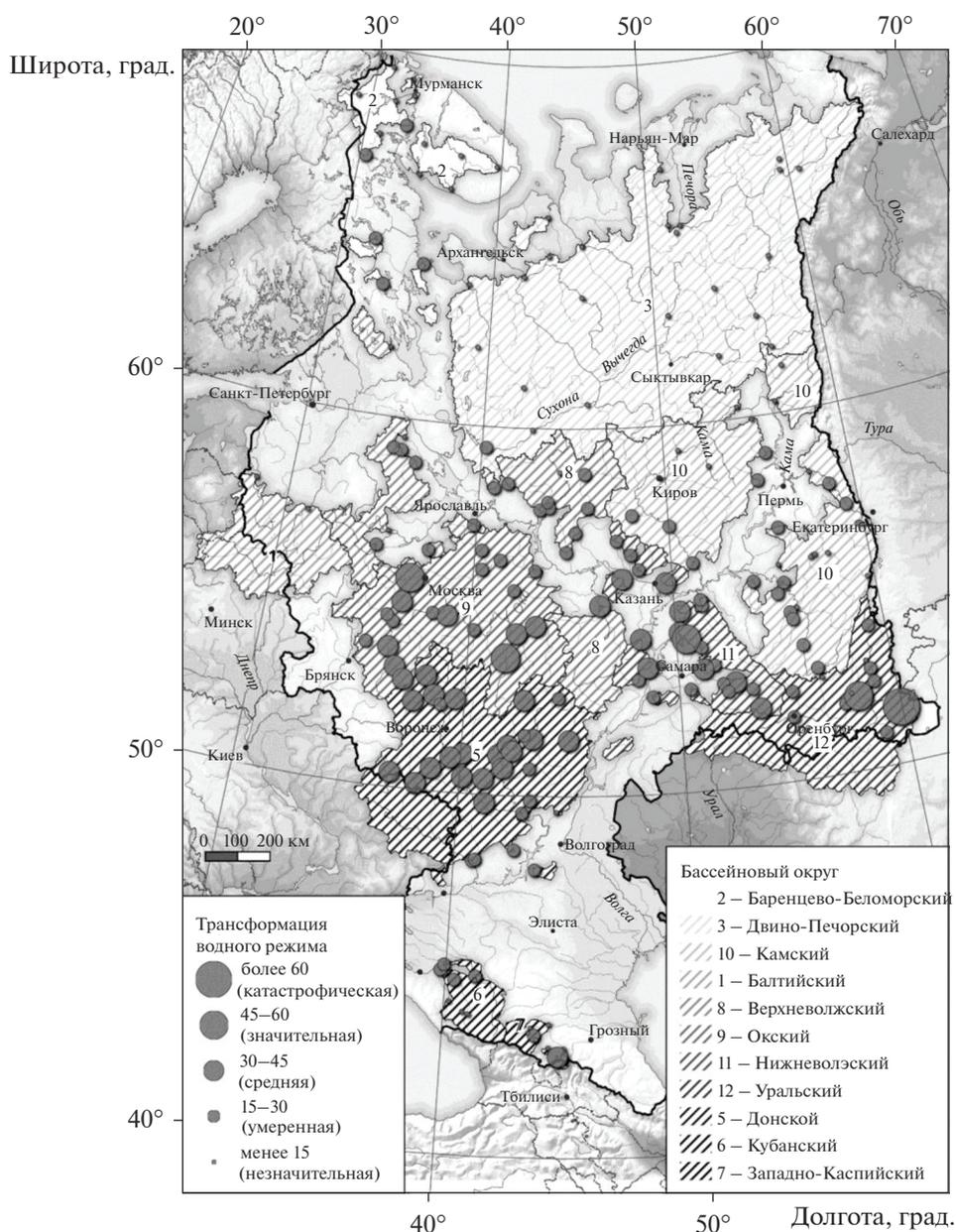


Рис. 1. Карта коэффициента трансформации водного режима рек ЕЧР в 1978–2016 гг. по сравнению с 1945–1977 гг.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК

Большинство публикаций в последнее десятилетие основаны на трех ключевых аспектах создания классификации водного режима на современном уровне развития научного знания: а) автоматизированные средства обработки исходных гидрологических данных; б) обоснованный региональными особенностями или спецификой задачи перечень используемых параметров; в)

унифицированная база данных по отобранным характеристикам.

Обработка исходных гидрологических данных проводится в готовых программных продуктах или написанием скрипта на одном из легко интерпретируемых языков программирования (R-Studio, Python, MatLab).

Среди готовых продуктов в международной практике наиболее популярна программа IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) [76, 89, 100]. При отсутствии генетического анализа рядов стока, ручном определении границ гидрологических сезонов и их пороговых значений программа поз-

воляет рассчитывать 66 характеристик водного режима.

Для выделения базисной составляющей стока можно использовать пакет HydroOffice [67], который подходит для рек с паводочным режимом. В пакетах WHAT (Web-based Hydrograph Analysis Tool) и HYSEP (Hydrograph Separation Program) [73, 102] выделение генетических составляющих стока ведется при помощи различных фильтров.

В российской практике применяют программный комплекс “Гидрорасчеты”, разработанный в НПО “Гидротехнологии” [12]. Альтернативой ему является программа HydroStatCalc (ГГИ) [23]. Кроме того, на кафедре гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова разрабатывается пакет GrWat [70], позволяющий проводить автоматизированное расчленение гидрографа по типам питания на основе его комплексного графоаналитического и генетического анализа и рассчитывать 53 характеристики водного режима, включая показатели паводочного стока.

В последнее время для анализа гидрологических рядов пользуются скриптами на языках R-Studio или Python, множество из которых имеет открытую лицензию и размещены на ресурсе ГитХаб [63]. Создание баз данных обычно реализуется средствами языков программирования Java или в форме запросов, отсылаемых к глобальным таблицам в формате .txt или .xlsx. Чаще всего базы данных являются основой для веб-приложений, которые позволяют визуализировать, обрабатывать и выгружать в нужном формате пространственно-временную информацию.

Ее первый уровень – представление о рельефе, физико-географических условиях, гидрографии, гидрометеорологической изученности водосборов. К таким ресурсам можно отнести сервисы HydroSHEDS [68] с информацией о границах водосборных бассейнов рек мира, полученных на основе анализа ЦМР SRTM с разрешением 3” с последующей генерализацией до разрешения 15” и 30”. При создании HydroSHEDS использовались данные о водных объектах SRTM (SRTM Water Body Data, SWBD); речная сеть с цифровой карты мира (Digital Chart of the World, также известная как VMAP0); база данных по озерам и водно-болотным угодьям (Global Lakes and Wetlands Database, GLWD) и несколько других глобальных и региональных цифровых карт речной сети.

Среди региональных баз данных можно отметить Ecrins (European catchments and rivers network system) [59]. Это набор векторных пространственных данных по Европе (в том числе ЕЧР) и Ближнему Востоку, включающий в себя реки, озера, элементарные и агрегированные водосборные бассейны, плотины, препятствия, гидропосты.

Среди отечественных разработок можно отметить геопортал “Речные бассейны Европейской России”, разработанный в Институте экологии и природопользования Казанского федерального университета [34]. Геопортал представляет собой разнообразные гидрометеорологические данные, сгруппированные по малым водосборам ЕЧР. Базовый слой “Бассейны” содержит 53865 бассейнов малых рек и межприточных пространств. Малые водосборы рассчитаны аналитически по ЦМР GMTED2010 [57] с пространственным разрешением 250 м и по цифровой карте гидрографической сети масштаба 1 : 1000000 с привлечением контуров объектов гидрографии с топографических карт [18, 19].

CatchX – веб-приложение, позволяющее в пределах выбранного водосборного бассейна визуализировать временные изменения за 25 лет по осадкам, температуре, суммарному испарению, стоку и типам почвенно-растительного покрова. Границы водосборов взяты по всему миру по HydroBASINS – всего 57646 бассейнов [55].

Гидрологически направленный ресурс FluentHydro разработан в рамках проекта РГО и РФФИ 2017–2019 гг. “Геоинформационное картографирование речного стока и его изменений в условиях нестационарного климата (на примере Северо-Запада России)” [61]. Портал работает в тестовом режиме и содержит информацию, отражающую гидрологическую изученность и визуализацию сеточных поверхностей, рассчитанных на основе сценариев изменений климата. Также предусмотрена возможность скачивать информацию за период с 2008 по 2017 г.

Новый веб-сервис – портал “Водный режим рек ЕЧР” [8], разработанный на кафедрах гидрологии суши и картографии и геоинформатики МГУ им. М.В. Ломоносова в рамках проекта РФФИ-РГО “Комплексное исследование и картографирование современного водного режима рек европейской территории России и его опасных проявлений”. На портале реализована привязка данных не только к гидрологическим постам, но и к их бассейнам, предусмотрена возможность выгрузки данных, динамического расчета параметров стока и статистической обработки полученных величин с помощью стандартных критериев, визуализации отдельных параметров в виде графиков.

Сейчас подобные порталы – основа мониторинга и прогнозирования опасных гидрометеорологических явлений. В настоящее время сервис Google развивает портал по глобальному прогнозу наводнений на основе алгоритмов машинного обучения [77, 86]. Ресурс может быть запущен в глобальном масштабе в ближайшие 2–3 года. С использованием алгоритмов машинного обучения начала работу система краткосрочного

Таблица 1. Доступные и наиболее часто используемые гидрологические базы данных

Ресурс	Период, годы	Пространственный охват	Интернет-адрес базы данных
АИС ГМВО	2007–2017	Территория РФ (2500 постов)	https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505
GRDC	1965–2020 (1985)	Общемировой (9900 постов)	https://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html
R-ArcticNet	1960 (1936)–1990	Региональный (3713 постов рек Арктической зоны)	http://www.r-arctic-net.sr.unh.edu/v4.0/index.html
Environmenti.fi	2001–2019	Финляндия	http://wwwi3.ymparisto.fi/i3/paasivu/ENG/Virtaama/Virtaama.htm
Banque HYDRO	1960–2019	Франция (5000 постов, 3200 – действующих)	http://hydro.eaufrance.fr/
eHYD	2014–2016 (ежегодники 2004–2019 гг.)	Австрия	https://wasser.umweltbundesamt.at/hydjb/ Ежегодники: https://www.bmlrt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/hydrographische_daten/jahrbuecher.html
Ymparisto	Текущие	Финляндия	http://wwwi2.ymparisto.fi/i2/90/wyax2/vesitilanne.html
VIGICRUE	>>	Франция	https://www.vigicruces.gouv.fr/
eHYD	>>	Австрия	https://ehyd.gv.at/
USGS	>>	США	https://maps.waterdata.usgs.gov/mapper/index.html
DORIS	>>	Бассейн Дуная	http://www.doris.bmk.gv.at/en/fairway-information/water-levels/achleiten
Центр Регистра и Кадастра	>>	Реки РФ (только по регистрации)	http://gis.vodinfo.ru/waterstocks/#
AllRivers	>>	Реки РФ	https://allrivers.info/

прогнозирования стока для некоторых рек России – OpenForecast [90]. В ее основе – данные гидрологического мониторинга и применение физико-математических моделей глобальной циркуляции атмосферы и океана, а также формирования речного стока.

Среди удачно реализованных национальных систем мониторинга режима водных объектов можно выделить eHyd (Австрия) и VIGICRUE (Франция). В большинстве развитых стран Европы архивные и оперативные характеристики стока объединены в рамках одного сервиса и доступны любому пользователю. Обычно такие сервисы имеют встроенный картографический блок, который позволяет искать нужную станцию на карте – подобная схема реализована для архивов в Финляндии, Австрии и США. Для крупных рек создано большое количество региональных баз

данных и сервисов, как, например, проект по мониторингу водных ресурсов в бассейне Дуная (DORIS).

В России оперативная информация по уровням воды официально не является общедоступной и не публикуется Росгидрометом открыто. Отдельные территориальные управления частично размещают оперативную информацию на своих сайтах. Так, например, по Северо-Западному УГМС доступна оперативная информация об уровне воды в Неве и Финском заливе [22]. Существующая Единая система мониторинга Мирового океана (ЕСИМО) [20] доступна только для сотрудников Росгидромета.

На сайте Центра Регистра и Кадастра [45] для зарегистрированных ранее пользователей доступна оперативная информация по уровням воды на

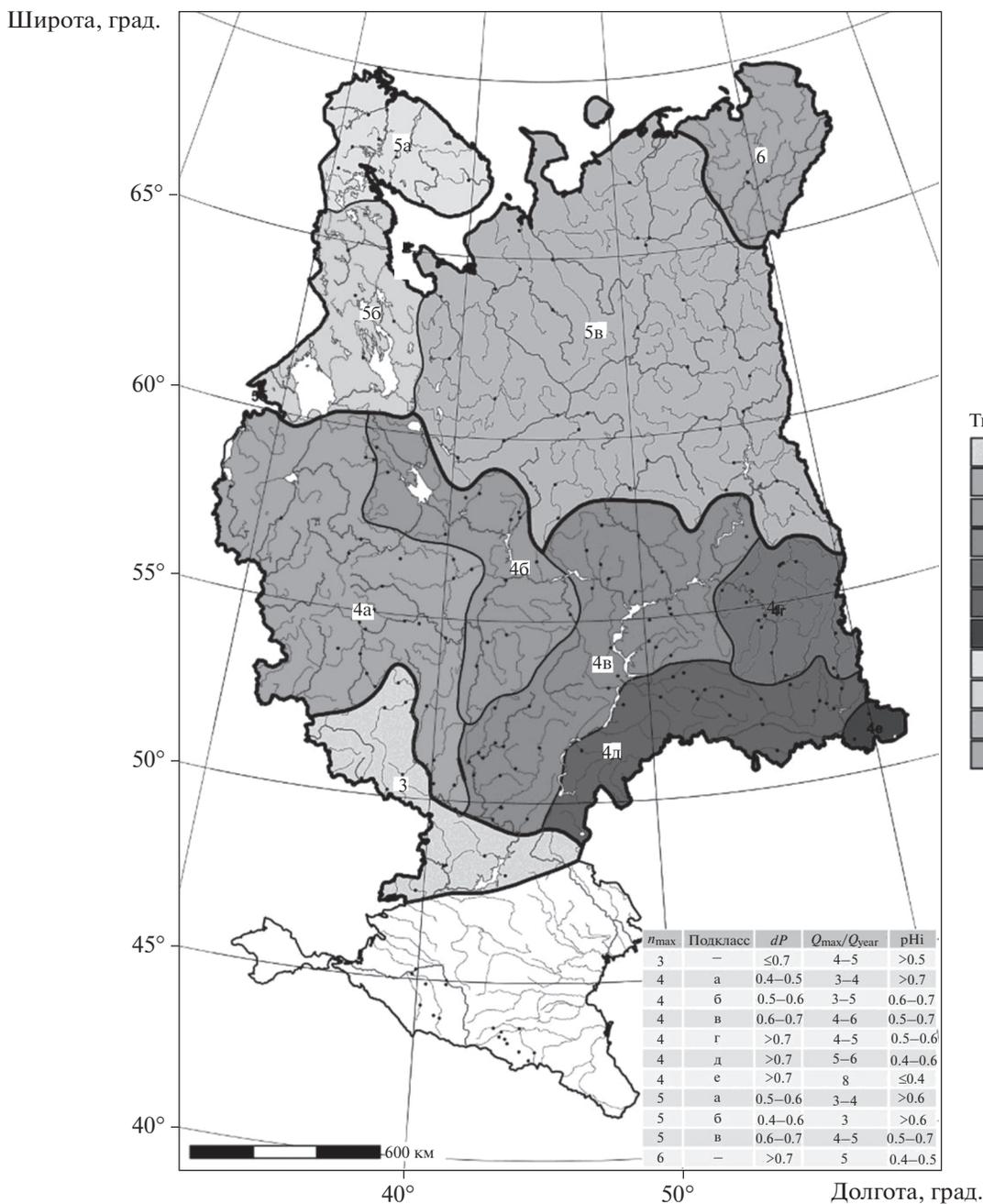


Рис. 2. Типы водного режима рек ЕЧР. Номер типа водного режима соответствует номеру месяца n_{\max} с максимальным месячным расходом воды. Подкласс отражает сочетание референсных значений доли половодья dP , соотношения максимального среднемесячного и годового расхода воды Q_{\max}/Q_{year} и коэффициента естественной зарегулированности стока $\rho_{\text{Ні}}$.

части гидрологических постов в пределах РФ. Единственная открытая система оперативных уровней воды на реках России – портал AllRivers [47]. Информация на нем – ознакомительная и не официальная, основная цель портала – поддержка водного туризма в регионах РФ.

Возможные источники гидрологической информации собраны и обобщены в табл. 1.

Создавая базы данных как основу классификаций водного режима рек, современные исследователи применяют традиционные методы кластерного анализа, такие как PCA, k-means, RG_Boost, интенсивно развивающиеся нейронные сети и алгоритмы Random Forest.

Более ранняя попытка кластеризовать типы водного режима на основе среднемесячных зна-

чений стока проделана в [65]. Авторы выделили до 15 групп рек с разным водным режимом и построили карту типов водного режима. В [49] для классификации гидрографов разных лет применены методы функционального анализа.

Один из наиболее перспективных методов – использование нейронной сети особой архитектуры с долгой краткосрочной памятью (Long short-term memory; LSTM), которая представляет собой последовательность слоев, каждый элемент которого принимает на вход сигналы от всех элементов предыдущего слоя [71].

В рамках проекта РФФИ–РГО авторами данной статьи предложена современная классификация типов водного режима рек ЕЧР на основе базы данных за 1978–2015 гг. и результатов ее обработки методом пространственно-ограниченной кластеризации. Районирование проведено по четырем показателям, привязанным к гидропостам: месяцу прохождения максимального месячного стока, доле весеннего стока, отношению максимального расхода к среднему годовому, коэффициенту естественной зарегулированности. Географически наиболее выразительный результат получился при использовании сочетания месяца прохождения максимального месячного стока и доли весеннего стока. Результирующая карта типов водного режима представлена на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование особенностей водного режима рек и его трансформации при изменении климата и антропогенном воздействии, разработка классификаций и схем районирования имеют исключительную научную и практическую значимость. Рост интереса к этому направлению связано с изменением степени изученности бассейнов рек, устареванием имеющихся картографических обобщений, внедрением новых методов и технологий анализа и обработки данных.

Эволюция созданных к концу XX в. классификаций отражает изменение гидрометрической и гидролого-климатической изученности бассейнов рек, накопление научных знаний об условиях формирования стока. Значительный рост использования водных ресурсов во всех сферах мировой экономики определил потребность в переходе от общегеографических, описательных классификаций и районирований к количественным.

Современные подходы к исследованию водного режима рек основаны на создании специализированных комплексных баз данных по климату и стоку рек, тематических электронных ГИС-проектов и карт. Большой объем привлекаемой гидрометеорологической информации предполагает переход к количественным классификациям на основе строгих расчетов параметров стока и

разработки новых критериев, характеризующих актуальные для различных отраслей экономики особенности формирования водного режима рек. Автоматизация средств обработки и интерпретации информации, разработка программных комплексов требуют новых методических рекомендаций по их использованию. Результаты современных исследований позволяют получить новые данные об изменении характеристик водного режима рек, в том числе на территории России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И.* Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 3–12.
2. *Астраханцев В.И.* О принципах гидрологического районирования Сибири и Дальнего Востока // Изв. СО АН СССР. № 2. 1958.
3. Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России / Под ред. *Р.Г. Джамалова, Н.Л. Фроловой.* М.: Ровикс, 2014. 96 с.
4. *Берг Л.С.* Географические зоны СССР. М.: Географгиз, 1947. 356 с.
5. *Броунов П.И.* К вопросу о географических районах Европейской России // Современные вопросы русского сельского хозяйства (к 50-летию юбилею И.А. Стебута). СПб., 1904. С. 23–45.
6. *Владимиров А.М.* Минимальный сток рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 214 с.
7. *Владимиров А.М.* Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 295 с.
8. Водный режим рек ЕТР [Электронный ресурс]. URL: <http://carto.geogr.msu.ru/hydrograph> (дата обращения 28.04.2020)
9. *Евстигнеев В.М., Шенберг Н.В., Анисимова Н.В., Зайцев А.А.* Водный режим рек России и сопредельных территорий. Карта для высших учебных заведений масштаба 1 : 8000000. Новосибирск: Новосибирская картографическая фабрика Роскартографии, 2001.
10. *Воейков А.И.* Избранные сочинения. Т. 1. М.; Л., 1948. 751 с.
11. *Волчек А.А., Шелест Т.А.* Формирование зимних паводков на реках Беларуси // Уч. зап. РГГМУ. Вып. 25. 2012. С. 5–19.
12. Гидрорасчеты: ГИС. СПб.: НПО “Гидротехнологии”, 2016. [Электронный ресурс]. URL: <http://hydrotec.spb.ru> (дата обращения 28.04.2020).
13. *Глушков В.Г.* Географо-гидрологический метод // Изв. ГГИ. № 57–58. 1933. С. 5–9.
14. ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1988.
15. *Григорьев А.А.* Опыт характеристики типов физико-географической среды // Проблемы физической географии. 1938. Вып. 5. С. 3–45.

16. Григорьев А.А., Будыко М.И. Классификация климатов СССР // Изв. АН СССР. Сер. географическая. № 3. 1959. С. 13–19.
17. Давыдов Л.К. Классификация рек Средней Азии по типу их питания // Зап. ГГИ. Т. 10. Л., 1933. С. 143–151.
18. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Иванов М.А. Автоматизированное построение границ бассейновых геосистем для Приволжского федерального округа // География и природ. ресурсы. 2014. № 3. С. 32–39.
19. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России // География и природ. ресурсы. 2017. № 2. С. 27–36.
20. ЕСИМО (Единая Система мониторинга Мирового океана). Центр океанографических данных ВНИИГМИ-МЦД. [Электронный ресурс]. URL: <http://esimo.ru/portal/> (дата обращения 28.04.2020).
21. Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году по территории СССР // Тр. НИУ ГУГМС. Сер. IV. Вып. 24. Л.; М., 1946. С. 67–95.
22. Карта фактического уровня воды в Финском заливе и реке Неве. Росгидромет. Северо-Западное УГМС. СПб., 2020. [Электронный ресурс]. URL: http://www.meteo.nw.ru/weather/lo_levelsd.php (дата обращения 28.04.2020).
23. Кокорев А.В., Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Программные средства автоматизации инженерных гидрологических расчетов. Руководство пользователя HydroStatCalc. СПб.: ГГИ, 2010. 45 с.
24. Коровин Е.П., Розанов А.Н. Почвы и растительность Средней Азии как естественная производительная сила // Тр. Средне-Азиатского гос. ун-та. Сер. XIIa. Вып. 17. 1938.
25. Кузин П.С. Карта испарения с поверхности речных бассейнов и водный баланс Европейской части СССР // Изв. ГГИ. № 68. 1934. С. 38–45.
26. Кузин П.С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 456 с.
27. Личков Б.Л. Естественные районы Украины. Киев, 1922. 61 с.
28. Лукьянович М.А. Генетическая и сезонная структуры речного стока континентов // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 125–133.
29. Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 274 с.
30. Львович М.И. Опыт классификации рек СССР // Тр. ГГИ. Вып. 6. 1938. С. 58–108.
31. Львович М.И. Элементы режима рек земного шара. М.: Гидрометеиздат, 1945. 126 с.
32. Национальный атлас России / Под ред. А.Н. Краюхина (Т. 1), В.М. Котлякова (Т. 2); отв. ред. Г.В. Поздняк. М.: Роскартография, 2004–2008.
33. Первухин М.А. Ландшафтоведение в СССР // Землеведение. Т. XL. Вып. 1. 1938. С. 66–77.
34. Речные бассейны Европейской части России. Казань: Казанский федеральный ун-т, Ин-т экологии и природопользования, 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://bassepr.kpfu.ru> (дата обращения 28.04.2020).
35. Савицкий П.И. Географические особенности России. Ч. I. 1927. 177 с.
36. Семенов-Тянь-Шанский В.П. Гидрологическая районизация Северной Евразии // Тр. первого всерос. гидрол. съезда. Л., 1925. С. 150–151.
37. Семенов-Тянь-Шанский В.П. Опыт гидрологического районирования Азиатской части СССР на основе построения климатических зон // Изв. ГГИ. 1933. № 57–58. С. 71–80.
38. Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Бугров А.А., Телегина А.А., Телегина Е.А. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС, 2015. 315 с.
39. Сукачев В. Н. Идея развития и фитоценология // Сов. ботаника. 1942. № 1–3. С. 5–17.
40. Троицкий В.А. Гидрологическое районирование СССР. М.; Л., 1948. 112 с.
41. Тутковский П.А. Природная районизация Украины. Киев, 1922.
42. Федосеев И.А. История проблемы классификации и районирования вод суши СССР. М., 2003. 160 с.
43. Фролова Н.Л., Григорьев В.Ю., Киреева М.Б., Харламов М.А. Анализ изменения стока рек Европейской территории России по дистанционным и наземным данным // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Т. 1. Воронеж, 2019. С. 520–525.
44. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова Н.А., Повалишников Е.С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории и его изменение // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 4–20.
45. Центр Регистра и Кадастра: информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 28.04.2020)
46. Allchin M. Characterisation and Classification of Hydrological Catchments in Alberta, Canada Using Growing Self-Organising Maps // Proc. 23rd GIS Res. UK (GISRUK) Conf Univ. Leeds. 2015. P. 55–63. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1491375>.
47. AllRivers: уровень воды онлайн. [Электронный ресурс]. URL: <https://allrivers.info> (дата обращения 28.04.2020)
48. Aschwanden H., Weingartner R. Die Abflussregimes der Schweiz. Bern: Geographisches Ins. Univ. Bern, Publ. Gewässerkunde, 1985. V. 65. 237 p.

49. *Auder B., Fischer A.* Projection-based curve clustering // *J. Statistical Computation and Simulation*. 2012. V. 82. Is. 8. P. 1145–1168.
<https://doi.org/10.1080/00949655.2011.572882>
50. *Bejarano M., Marchamalo M., Garcia de Jalon D., González del Tánago M.* Flow regime patterns and their controlling factors in the Ebro basin (Spain) // *J. Hydrol.* 2010. V. 385. P. 323.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.001>
51. *Berhanu B.B., Seleshi Y., Demisse S.S., Melesse A.M.* Flow Regime Classification and Hydrological Characterization: A Case Study of Ethiopian Rivers // *Water*. 2015. V. 7. P. 3149–3165.
<https://doi.org/10.3390/w7063149>
52. *Blöschl G., Hall J., Parajka J. et al.* Changing climate shifts timing of European flood // *Sci.* 2017. V. 357. Iss. 6351. P. 588–590.
<https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
53. *Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al.* Changing climate both increases and decreases European river floods // *Nature*. 2019. № 573. P. 108–111.
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
54. *Bower D., Hannah D.M., McGregor G.R.* Techniques for assessing the climatic sensitivity of river flow regimes // *Hydrol. Processes*. 2004. V. 18. P. 2515–2543.
<https://doi.org/10.1002/hyp.1479>
55. CatchX – Catchment Water Explorer App. [Электронный ресурс]. URL: <https://ewgis.org/catchx-global/> (дата обращения 28.04.2020)
56. *Dallaire C.O., Lehner B., Sayre R., Thieme M.* A multidisciplinary framework to derive global river reach classifications at high spatial resolution // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. № 2. 024003.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad8e9>
57. *Danielson J.J., Gesch D.B.* Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). U.S. Geol. Survey. 2011. 26 p.
58. *Dettinger M.D., Diaz H.F.* Global characteristics of stream flow seasonality and variability // *J. Hydrometeorol.* 2000. V. 1. P. 289–310.
[https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2000\)001<0289:GCOSFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2000)001<0289:GCOSFS>2.0.CO;2)
59. Ecrins (European catchments and rivers network system). EU Open Data Portal, European Environment Agency [Электронный ресурс]. URL: https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/data_european-catchments-and-rivers-network (дата обращения 28.04.2020)
60. *Finlayson B.L., McMahon T.A.* Australia vs. the World: a comparative analysis of stream flow characteristics // *Fluvial Geomorphology of Australia / Ed R.F. Werner*. Sydney: Acad. Press, 1988. P. 17–40.
61. FluentHydro. [Электронный ресурс]. URL: <http://185.204.0.167/portal/map.html> (дата обращения 28.04.2020).
62. *Gharari S., Hrachowitz M., Fenicia F., Savenije H.H.G.* Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 3275–3291.
<https://doi.org/10.5194/hess-15-3275-2011>
63. GitHub: размещение пакетных приложений и разработок ГитХаб. GitHub Inc., 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com> (дата обращения 28.04.2020)
64. GloRiC Version 1.0 [Электронный ресурс]. URL: www.hydrosheds.org/page/gloric (дата обращения 10.02.2020)
65. *Haines A.T., Finlayson B.L., McMahon T.A.* A global classification of river regimes // *Applied Geography*. 1988. V. 8. P. 255–272.
66. Hydrological Atlas of Switzerland [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hydrologischeratlas.ch> (дата обращения 26.04.2020)
67. HydroOffice: Software for hydrology, meteorology, geoscience a data science. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hydrooffice.org> (дата обращения 28.04.2020)
68. HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hydrosheds.org/> (дата обращения 28.04.2020)
69. *Kennard M.J., Pusey B.J., Olden J.D., Mackay S.J., Stein J.L., Marsh N.* Classification of natural flow regimes in Australia to support environmental flow management // *Freshwater Biol.* 2010. V. 55. P. 171–193.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02307.x>
70. *Kireeva M., Frolova N., Rets E., Samsonov T., Entin A., Kharlamov M., Telegina E., Povalishnikova E.* Evaluating climate and water regime transformation in the European part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period // *Int. J. River Basin Management*. 2019. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1695258>
71. *Kratzert F., Klotz D., Shalev G., Klambauer G., Hochreiter S., Nearing G.* Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2019. V. 23. P. 5089–5110.
<https://doi.org/10.5194/hess-23-5089-2019>
72. *Kuentz A., Arheimer B., Hundecha Y., Wagener T.* Understanding hydrologic variability across Europe through catchment classification // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. V. 21. P. 2863–2879.
<https://doi.org/10.5194/hess-21-2863-2017>
73. *Kyoung J.L., Bernard A.E., Zhenxu T., Joongdae C., Ki-Sung K., Suresh M., Dibyajyoti T.* Automated Web GIS Based Hydrograph Analysis Tool, WHAT // *J. Am. Water Resour. Association*. 2005. V. 41(6). P. 1407–1416.
74. *Lane B.A., Dahlke H.E., Pasternack G.B., Sandoval-Solis S.* Revealing the Diversity of Natural Hydrologic Regimes in California with Relevance for Environ-

- mental Flows Applications // JAWRA. 2016. P. 1–20. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12504>
75. *Mackay S.J., Arthington A.H., James C.S.* Classification and comparison of natural and altered flow regimes to support an Australian trial of the Ecological Limits of Hydrologic Alteration framework // *Ecohydrol.* 2014. V. 7. Iss. 6. P. 1485–1507. <https://doi.org/10.1002/eco.1473>
76. *Mathews R., Richter B.D.* Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting // JAWRA. 2007. V. 43. P. 1400–1413. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00099.x>
77. *Matias Y.* Keeping people safe with AI-enabled flood forecasting // Google the Keyword, retrieved 2018-09-24. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.blog.google/products/search/helping-keep-people-safe-ai-enabled-flood-forecasting/> (дата обращения 28.04.2020)
78. *Matti B., Dahlke H.E., Dieppois B., Lawler D.M., Lyon S.W.* Flood seasonality across Scandinavia – Evidence of a shifting hydrograph? // *Hydrol. Processes.* 2017. V. 31. Is. 24. P. 4354–4370. <https://doi.org/10.1002/hyp.11365>
79. *Matti B., Dahlke H.E., Lyon S.W.* On the variability of cold region flooding // *J. Hydrol.* 2016. V. 534. P. 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.055>
80. *McMahon T., Vogel R.M., Peel M.C., Pegram G.G.S.* Global stream flows – Part 1: Characteristics of annual stream flows // *J. Hydrol.* 2007. V. 347. P. 243–259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.002>
81. *McManamay R.A., Orth D.J., Dolloff C.A., Frimpong E.A.* A regional classification of unregulated stream flows: spatial resolution and hierarchical frameworks // *River Res. Applic.* 2011. V. 28. Iss. 7. P. 1019–1033. <https://doi.org/10.1002/rra.1493>
82. *Merz B., Dung N.V., Apel H., Gerlitz L., Schröter K., Steirou E., Vorogushyn S.* Spatial coherence of flood-rich and flood-poor periods across Germany // *J. Hydrol.* 2018. V. 559. P. 813–826. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.082>
83. *Mudelsee M., Börngen M., Tetzlaff G., Grünwald U.* No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe // *Nature.* 2003. V. 425. P. 166–169. <https://doi.org/10.1038/nature01928>
84. *Hydrology: A Science of Nature / Eds Musy A., Higy C.* Boca Raton: Taylor & Francis Group. CRC Press, 2010. 346 p. <https://doi.org/10.1201/b10426>
85. Natural Resources Canada. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/resources/maps> (дата обращения 02.04.2020)
86. *Nevo S.A.* Summary of the Google Flood Forecasting Meets Machine Learning Workshop // Google AI Blog: The latest news from Google AI. 2019. March 18. [Электронный ресурс]. URL: <https://ai.googleblog.com/2019/03/a-summary-of-google-flood-forecasting.html> (дата обращения 28.04.2020)
87. *Nováky B., Bálint G.* Shifts and modification of the hydrological regime under climate change in Hungary // *Climate Change – Realities, Impacts Over Ice Cap, Sea Level and Risks.* 2013. P. 163–190. <https://doi.org/10.5772/54768>
88. *Olden J., Kennard M., Pusey B.* A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology // *Ecohydrol.* 2012. V. 5. P. 503–518. <https://doi.org/10.1002/eco.251>
89. *Olden J.D., Poff N.L.* Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes // *River Res. Applications.* 2003. V. 19. P. 101–121. <https://doi.org/10.1002/rra.700>
90. OpenForecast. Веб-портал по общедоступному гидрологическому прогнозированию [Электронный ресурс]. URL: <https://openforecast.github.io> (дата обращения 28.04.2020)
91. *Oueslati O., De Girolamo A.M., Abouabdillah A., Porto A.L.* Attempts to flow regime classification and characterisation in Mediterranean streams using multivariate analysis // *Int. Workshop “Advances in statistical hydrology”.* Taormina, Italy, 2010. P. 1–15.
92. *Pinskwar I., Kundzewicz Z.W., Peduzzi P., Brakenbridge G.R., Stahl K., Hannaford J.* Changing Floods in Europe // *Changes in Flood Risk in Europe / Ed. Kundzewicz Z.W.* Wallingford, UK: IAHS Press, 2012. P. 83–96.
93. *Poff L., Ward V.* Implications of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure: A Regional Analysis of Streamflow Patterns // *Can. J. Fisheries and Aquatic Sci.* 1989. V. 46. P. 1805–1817. <https://doi.org/10.1139/f89-228>
94. *Renard B., Lang M., Bois P., Dupeyrat A., Mestre O., Niel H., Sauquet E., Prudhomme C., Parey S., Paquet E., Neppel L., Gailhard J.* Regional methods for trend detection: assessing field significance and regional consistency // *Water Resour. Res.* 2008. V. 44. P. W08419. <https://doi.org/10.1029/2007WR006268>
95. *Sanborn S.C., Bledsoe B.P.* Predicting streamflow regime metrics for ungauged streams in Colorado, Washington, and Oregon // *J. Hydrol.* 2006. V. 325. P. 241–261. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.018>
96. *Sawicz K., Wagener T., Sivapalan M., Troch P.A., Carrillo G.* Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 2895–2911. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2895-2011>
97. *Sjöberg Y., Frampton A., Lyon S.W.* Using streamflow characteristics to explore permafrost thawing in northern Swedish catchments // *Hydrogeol. J.* 2013.

- V. 21(1). P. 121–131.
<https://doi.org/10.1007/s10040-012-0932-5>
98. *Snelder T.H., Booker D.J.* Natural flow regime classifications are sensitive to definition procedures // *River Res. Applic.* 2012. V. 29. Iss. 7. P. 822–838.
<https://doi.org/10.1002/rra.2581>
99. *Stahl K., Tallaksen L.M., Hannaford J., van Lanen H.A.J.* Filling the white space on maps of European runoff trends: estimates from a multi-model ensemble // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. P. 2035–2047.
<https://doi.org/10.5194/hess-16-2035-2012>
100. The Nature Conservancy. Indicators of Hydrologic Alteration. Version 7.1. User's manual. Virginia, Arlington, 2009. 75 p.
101. *Vormoor K., Lawrence D., Schlichting L., Wilson D., Wong W.K.* Evidence for changes in the magnitude and frequency of observed rainfall vs. snowmelt driven floods in Norway // *J. Hydrol.* 2016. V. 538. P. 33–48.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.066>
102. WHAT: Web-based Hydrograph Analysis Tool. [Электронный ресурс]. URL: <https://engineering.purdue.edu/mapserve/WHAT/> (дата обращения 28.04.2020)
103. *Wilson D., Hannah D.* Spatial and temporal variability of UK river flow regimes // *IAHS-AISH Publication.* 2002. № 274. P. 457–464.
104. *Wrzesiński D., Sobkowiak L.* Detection of changes in flow regime of rivers in Poland // *J. Hydrol. Hydro-mech.* 2018. V. 66. № 1. P. 55–64.
<https://doi.org/10.1515/johh-2017-0045>