

УДК 504.45(470.26)(045)

*Ю.А. Спирин***ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧНОГО СТОКА В ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СЛАВСКОГО РАЙОНА КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Важным вопросом в геоэкологических исследованиях водотоков можно считать наличие целостных и продолжительных гидрологических рядов. На их основе производится большая часть гидрологических расчетов и построений, без которых невозможно качественное и рациональное водопользование. К сожалению, в Калининградской области есть ряд сложностей с получением полного комплекта зафиксированных результатов гидрологического мониторинга, проводимого за водотоками. Целью работы стал сбор гидрологической информации и расчёт основных гидрологических характеристик речного стока некоторых водотоков Славского района. Собраны все имеющиеся данные о гидрометрических наблюдениях за реками рассматриваемой территории, на основе которых были составлены гидрологические ряды среднегодовых расходов. Этими реками являются: Злая, Оса, Матросовка и Немонинка. Восстановлены отсутствующие данные в гидрологических рядах среднегодовых расходов воды рассматриваемых рек. Построены кривые обеспеченности среднегодовых расходов по восстановленным данным, а также рассчитаны средние многолетние расходы, коэффициенты вариации и коэффициенты асимметрии исследуемых водных объектов. Вся методология опиралась на действующий свод правил для гидрологических расчётов. Полученные результаты могут сыграть важную роль в дальнейших геоэкологических исследованиях водотоков Славского района, планировании их использования и в различных проектных мероприятиях по развитию водопользования.

Ключевые слова: водотоки, геоэкологические исследования, средний многолетний расход, польдер, кривая обеспеченности, гидрологические ряды, Славский район, Калининградская область.

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-2-185-197

Базисом для качественных и хорошо спланированных геоэкологических исследований водных объектов всегда считалась информационная осведомленность об их гидрологических характеристиках и особенностях [1-4]. В научно-прикладном и водохозяйственном направлениях главными инструментами для получения подобной информации можно выделить: многолетний мониторинг различных гидрометрических параметров водных объектов, инженерно-гидрологические изыскания, гидрологические расчёты, анализ гидрологических массивов данных и др. Без реализации вышперечисленного невозможна эффективная деятельность в строительстве, сельском хозяйстве, коммунальном хозяйстве, гидротехнической мелиорации, туризме и других отраслях экономики, которые являются приоритетными для устойчивого развития региона.

Речная сеть, а также водотоки по отдельности больше всего на практике осваиваются людьми для удовлетворения своих потребностей. Реки используются для создания водохранилищ, гидроэлектростанций, транспортных артерий, гидротехнических сооружений, водоприемников и т.д. Особый интерес представляет изучение речного стока, так как именно на численной интерпретации этого параметра и его поведении основываются ключевые виды водопользования, вследствие этого, рациональные геоэкологические исследования и оценка геоэкологического потенциала водотоков также связаны с ним.

Одной из отличительных особенностей Калининградской области является густая речная сеть и наличие польдерных земель, обладающих высоким плодородием. Площадь польдеров составляет около 100 тыс. га (70 % польдеров России). Самый крупный польдерный массив расположен на территории Неманской низменности в МО «Славском городском округе» (далее Славский район). Это основная польдерная территория региона, около 68 % от всех польдерных земель Калининградской области. Большинство земель используются под ведение сельского хозяйства, а в частности 80,4 тыс. га (59,6 % от общей площади земель). Эта ландшафтная особенность, а также избыточное увлажнение и активное ведение сельского хозяйства привели к формированию обширной осушительной гидротехнической мелиоративной сети на рассматриваемой территории, без нормальной работы всех компонентов которой невозможно продуктивное ведение сельского хозяйства. В постсоветский период гидротехнических исследований водотоков этой польдерной территории не проводилось, сис-

тематический экологический мониторинг водотоков отсутствует, оценок загрязнения и геоэкологического состояния не осуществлялось.

В связи с этим Славский район был выбран для нашего исследования, поскольку территория имеет стратегическую важность, и играет одну из ведущих ролей в достижении продовольственной безопасности и ресурсной самообеспеченности Калининградской области. Поверхностные водные объекты суши Славского района имеют многоцелевое использование по различным направлениям, но основными можно выделить сельское хозяйство и осушительную гидротехническую мелиорацию. Актуальным вопросом в планировании и качественном функционировании этих видов антропогенной деятельности также можно считать проведение различных гидрологических и геоэкологических исследований и наблюдений [4-7].

Гидрологические ежегодники [8; 9] и автоматизированные информационные системы государственного мониторинга [10] являются основными источниками, в которых аккумулируются гидрологические данные в РФ. Здесь и начинаются первые существенные трудности и преграды для исследования большинства речных бассейнов региона. Проектные институты, библиотечные фонды, университеты и государственные управления, находящиеся в Калининградской области, имеют в своих архивах неполные комплекты гидрологических ежегодников. По рассматриваемому объекту менее 5 % от общего количества. Автоматизированные системы мониторинга предлагают лишь результаты измерений за последние 10–12 лет, а количество водотоков, за которыми ведутся наблюдения, меньше чем было в СССР. Ситуация помимо этого обостряется тем, что за некоторые, а порой и многие годы мониторинг и вовсе не проводился, что приводит к отсутствию данных.

Общедоступность гидрологических данных по региону, несмотря на открытый доступ к ним, вызывает вопросы. Возможно, в каких-либо из перечисленных структур имеется полный перечень гидрологических ежегодников (или переведенная в электронный вид информация из них), но по каким-то причинам её нам не предоставили по официальному запросу, что еще раз подтверждает сказанное ранее. В век информационных технологий доступ к подобным материалам должен производиться дистанционно и в электронном виде для всех желающих, начиная от специалистов в этой области и крупных организаций, до небольших частных фермерских хозяйств, молодых ученых и студентов. Последнюю категорию стоит выделить отдельно, так как для них открытый и по настоящему свободный доступ к этим сведениям является ключевым фактором, поскольку они не имеют мощного административного ресурса для оперативного получения гидрологических данных для реализации целей исследовательского, научного, образовательного и прикладного характера.

Рассчитанные гидрологические характеристики по исследуемым водотокам будут сопряжены с имеющимися ретроспективной гидрохимической информацией и результатами гидрохимического мониторинга, проводимого автором, что позволит оценить загрязнение и геоэкологическое состояние исследуемых водотоков.

Цель работы – сбор гидрологической информации и расчёт основных гидрологических характеристик речного стока по данным систематических многолетних наблюдений для использования их при дальнейшем планировании и развитии рационального водопользования, а также при различных геоэкологических исследованиях водотоков на рассматриваемом польдерном массиве.

Материалы и методы исследований

Как говорилось ранее, поиск всей многолетней зафиксированной гидрологической информации вопрос не менее важный, чем её обработка и анализ. Когда поиск по местным компетентным органам оказался мало результативным, было принято решение обратиться в 3 места, где должны находиться интересующие нас сведения. Ими выступили коммерческая фирма, предоставляющая данные в электронном виде на платной основе и два института «Государственный гидрологический институт» (г. Санкт-Петербург) и «Институт водных проблем РАН» (г. Москва), в фондах которых находятся гидрологические ежегодники на бумажных носителях. В данных, которые предоставляла коммерческая организация, также были пробелы за многие годы мониторинга, а также отсутствовали результаты измерений по одной из рек. Ситуация с ежегодниками в «Институте водных проблем РАН» обстояла намного лучше, чем в Калининграде, но всё равно не хватало экземпляров за многие годы. Единственное место, которое имело полный комплект библиографии по исследуемой территории, это «Государственный гидрологический институт», так как гидрологические ежегодники издавал ФГУП «Гидрометеоздат».

Многолетний систематический гидрологический мониторинг проводился за следующими водотоками: река Злая – село Приозерье; река Оса – село Краснознаменское; река Матросовка – деревня Мостовое; река Немонинка – село Тимирязево. Данные реки относятся к бассейну Куршского залива и классифицируются как водоёмы первой и высшей категории рыбохозяйственного значения. На сегодняшний день наблюдения проводятся только по реке Злая и реке Матросовка, на тех же гидропостах. Эти водотоки представляют наибольший интерес для исследования, поскольку они имеют продолжительный период наблюдений, а также характеризуют речную сеть территории в целом, что в некоторых случаях позволит проецировать полученные результаты на другие реки Славского района.

Из полученных в «Государственном гидрологическом институте» и «Автоматизированной системе государственного мониторинга водных объектов» [10] массивов данных, построены гидрологические ряды среднегодовых расходов воды (рис. 1). В работе будут рассмотрены именно среднегодовые расходы воды как часто используемые в большинстве областей водопользования, при оценке водного и геоэкологического потенциала, а также характеристике речной сети. Для более конкретных задач по аналогии можно сделать расчеты и для минимальных или максимальных годовых расходов.

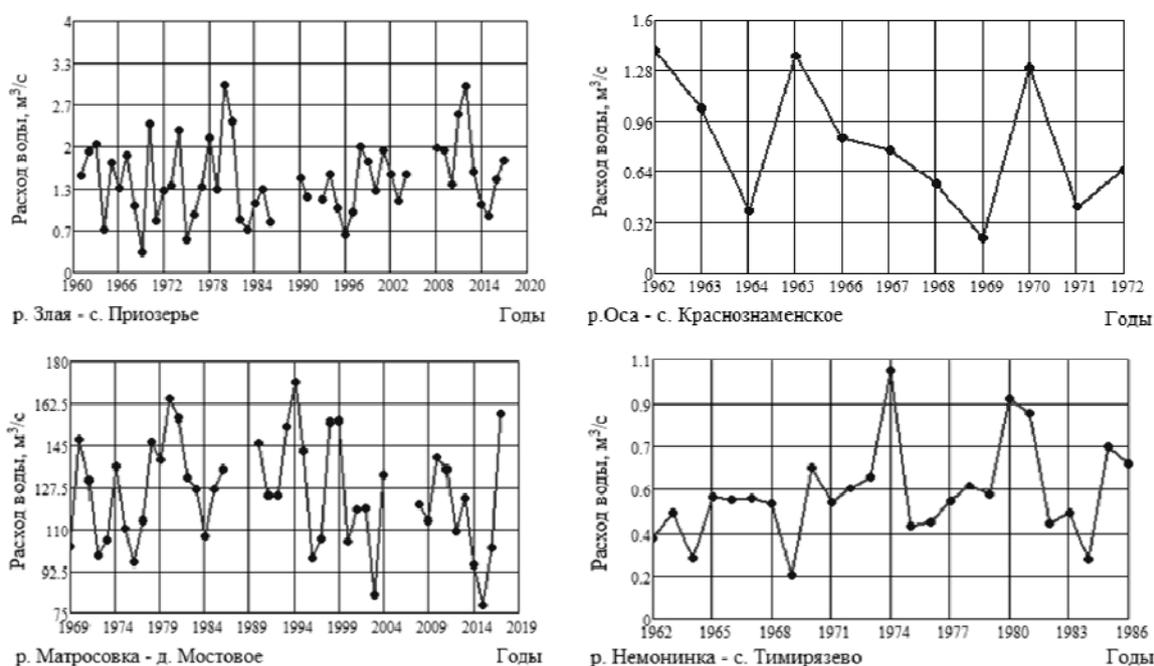


Рис. 1. Гидрологические ряды среднегодовых расходов воды исследуемых рек

Как можно видеть из рис. 1, в результатах мониторинга отсутствуют результаты наблюдения за некоторые годы. В эти годы мониторинг не проводился. Основопологающим методом восстановления отсутствующих данных в гидрологических рядах среднегодовых расходов воды исследуемых рек выступил метод «Восстановления гидрологического ряда по ряду аналогу». Проверка достаточности продолжительности периодов наблюдений осуществлена при помощи относительной погрешности выборочного среднего расхода. Для проверки однородности гидрологических рядов среднегодовых расходов использовались критерии Стьюдента и Фишера. Кривые обеспеченности среднегодовых расходов построены при помощи распределение Крицкого-Менкеля (трёхпараметрическое гамма-распределение). Эти методы регламентируются сводом правил 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» [11], а также широко используются в научных работах [12-15].

К сожалению, в качестве рек аналогов не получится использовать реки Калининградской области по причине того, что данные мониторинга отсутствуют за одни и те же периоды. Не стоит забывать и про сложности связанные со сбором и сопоставлением гидрологических рядов. В качестве рек аналогов были рассмотрены различные реки следующих стран: Польша, Чехия, Франция, Германия, Великобритания и Литва. Это связано с тем, что эти страны ведут длительный и, в большинстве случаев непрерывный мониторинг водных объектов, а его результаты предоставляются всем желающим сразу в электронном виде. Это упрощает процесс перебора потенциальных аналогов на предмет

синхронности колебаний среднегодовых расходов. Также территории этих стран подходят по ряду других условий, которые необходимо учитывать при подборе аналога.

Гидрологические ряды среднегодовых расходов воды для подбора рек аналогов были предоставлены: «Федеральным институтом гидрологии Германии» (The German Federal Institute of Hydrology) [16]; «Министерством экологии, устойчивого развития и энергетики Франции» (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie) [17]; «Центром экологии и гидрологии Соединённого Королевства» (UK Centre for Ecology & Hydrology) [18]. Сами же данные получены через закрепленные к организациям автоматизированные электронные системы [19-21].

Результаты и их обсуждение

Таблица 1

Краткая природно-географическая и гидрологическая характеристика исследуемых водотоков и подобранных к ним аналогов [22]

Исследуемая река и местонахождение её гидропоста	Река-аналог и местонахождение её гидропоста
<i>Природно-географическая характеристика территории</i>	
р. Злая – с. Приозерье; р. Оса – с. Краснознаменское; р. Матросовка – д. Мостовое; р. Немонинка – с. Тимирязево	r. Water of Leith – Murrayfield
Реки протекают по дельтовой низменности реки Неман. Рельеф местности представлен плоскими озерными и болотными низинными равнинами, а также плоскими морскими и аллювиально-морскими равнинами. Климат переходный от умеренно-морского к умеренно континентальному с мягкой, изменчивой зимой и относительно прохладным летом. Среднегодовое количество осадков 700 мм.	Река протекает по Среднешотландской низменности. Климат умеренно морской, относительно мягкий, с тёплой зимой и прохладным летом. Среднегодовое количество осадков 667 мм.
	r. Jagst – t. Schwabsberg
	Река протекает по Верхнерейнской низменности. Климат умеренный, с тёплой зимой и летом. Среднегодовое количество осадков 570 мм.
	r. Warta – t. Skwierzyzna
	Большая часть реки протекает по Великопольской низменности. Климат умеренно континентальный с мягкой зимой и теплым влажным летом. Среднегодовое количество осадков 530 мм.
	r. Czarna – t. Okonek
	Река протекает по Мазовецкой низменности. Климат умеренно континентальный с мягкой зимой и теплым влажным летом. Среднегодовое количество осадков 520 мм.
<i>Общая гидрологическая характеристика</i>	
р. Злая – с. Приозерье	r. Water of Leith – Murrayfield
р. Злая – река в России, находящаяся в Калининградской области. Река берёт своё начало из реки Луговая, в окрестностях села Калужское. Длина реки составляет 62 км, водосборная площадь – 292 км ² . Гидропост действует с 31.01.1961 г. - по н.в. Средний многолетний расход по имеющимся данным составляет – 1,48 м ³ /с.	г. Water of Leith – река в Шотландии, протекающая через Эдинбург. Исток реки – водохранилище Харперриг. Длина реки составляет 35 км, водосборная площадь – 107 км ² . Гидропост действует с 1964 – по н.в. Средний многолетний расход по имеющимся данным составляет – 1,54 м ³ /с.
р. Оса – с. Краснознаменское	r. Jagst – t. Schwabsberg
р. Оса – река в России, находится в Калининградской области. Исток реки находится в районе села Калужского в Черняховском районе. Длина реки 38 км, водосборная площадь – 98,1 км ² . Гидропост действовал с 01.01.1962 г. - 31.12.1972 г. Средний многолетний расход по имеющимся данным составляет – 0,81 м ³ /с.	г. Jagst – река в Германии. Исток реки начинается вблизи города Вальксхайм. Длина реки составляет 190 км, водосборная площадь – 1830 км ² . Гидропост работает с 1941 г. – по н.в. Средний многолетний расход по имеющимся данным составляет 1,87 м ³ /с.

Окончание табл. 1

р. Матросовка – д. Мостовое	г. Warta – t. Skwierzyna
р. Матросовка – река в России, которая находится в Калининградской области, рукав р. Неман. Река берёт своё начало из реки Немана – в 48 км от его устья ниже города Советска. Длина реки – 43 км. Гидропост действует с 17.12.1968 г. – по н.в. Также имеются наблюдения за уровнем воды с 1947 г. по 1967 г. (гидропост пос. Заповедное). Средний многолетний расход по имеющимся данным составляет – 125,32 м ³ /с.	г. Warta – река в Польше, правый приток Одера. Исток реки начинается вблизи города Кромолов. Длина реки составляет 808 км, водосборная площадь – 54529 км ² . Гидропост действует с 1950 – по н.в. Средний многолетний расход по имеющимся данным составляет – 124,08 м ³ /с.
р. Немонинка – с. Тимирязево	г. Czarna – t. Okonek
р. Немонинка – река в России, находится в Калининградской области. Исток реки находится неподалёку от ответвления реки Матросовки от реки Немана. Длина реки составляет 46 км, водосборная площадь – 1380 км ² . Гидропост действовал с 12.09.1962 г. по 01.01.1988 г. Средний многолетний расход по имеющимся данным составляет – 0,53 м ³ /с.	г. Czarna – река в Польше, левый приток Вислы. Исток реки начинается в окрестностях Вежховины. Длина реки составляет 47,4 км, водосборная площадь – 230 км ² . Гидропост действует с 1970 г. – по н.в. Средний многолетний расход по имеющимся данным составляет – 0,36 м ³ /с.

При выборе рек аналогов мы старались учитывать следующие факторы: однотипность стока реки-аналога и исследуемой реки; географическую близость расположения водосборов; однородность условий формирования стока; сходство климатических условий; продолжительность гидрологических наблюдений; наличие синхронности в колебаниях речного стока и стока-аналога, который количественно выражают через коэффициент парной корреляции между стоком в этих пунктах и т.д. [11]. Идеальных аналогов не бывает, но имеют место различные компромиссы. По совокупности этих факторов были выбраны следующие реки аналоги, которые на наш взгляд, отвечают условию гидрологического подобия по отношению к исследуемым водным объектам (табл. 1).

Все дальнейшие расчёты производились в среде MathCAD, и поэтому для более лаконичного повествования некоторые формулы будут представлены его операторами. Все формулы были взяты из источника [11], а также научных работ, опирающихся на него, поэтому в нашей работе будут указаны самые основные из них.

Часть исследуемых (восстанавливаемых) гидрологических рядов (Q_i , м³/с) рек Злая, Немонинка, Матросовка, Оса и часть гидрологических рядов рек аналогов (Q_a , м³/с) Water of Leith, Czarna, Warta, Jagst за последние 10 лет в годы совместных наблюдений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исследуемые (восстанавливаемые) гидрологические ряды и часть гидрологических рядов Рек-аналогов за последние 10 лет, в годы совместных наблюдений

Злая (2008–2017)	Water of Leith (2008–2017)	Оса (1963–1972)	Jagst (1963–1972)	Матросовка (2008–2017)	Warta (2008–2017)	Немонинка (1977– 1986)	Czarna (1977– 1986)
1,98	2,18	1,04	2,00	120,14	101,64	0,50	0,43
1,95	1,60	0,39	1,11	114,05	99,32	0,57	0,32
1,41	1,94	1,37	4,06	140,08	198,11	0,53	0,40
2,52	2,06	0,85	3,03	135,00	156,11	0,93	0,56
2,96	2,45	0,77	1,63	109,49	86,35	0,88	0,63
1,61	1,48	0,56	2,76	123,22	144,94	0,41	0,42
1,08	1,76	0,22	1,70	95,07	97,01	0,45	0,29
0,91	1,34	1,29	3,04	78,41	67,59	0,26	0,34
1,48	1,42	0,42	0,92	102,40	74,56	0,73	0,51
1,78	1,71	0,64	1,14	158,33	126,70	0,66	0,43

Из данных табл. 2 находим средние расходы (Q_{is} и Q_{as} , м³/с), средние квадратические отклонения рядов (σ_i и σ_a , м³/с) и коэффициенты парной корреляции между исследуемыми гидрологическими рядами и частями гидрологических рядов рек аналогов за 10 лет (r_{ia}). Данные представлены в табл. 3.

Таблица 3

Средние расходы, средние квадратические отклонения рядов и коэффициенты парной корреляции между исследуемыми гидрологическими рядами и частями гидрологических рядов рек-аналогов за 10 лет

Название реки	Q_{is}	σ_i	Название реки	Q_{as}	σ_a	r_{ia}
Злая	1,77	0,63	Water of Leith	1,79	0,36	0,764
Оса	0,76	0,39	Jagst	2,14	1,04	0,752
Матросовка	117,62	23,24	Warta	115,23	40,94	0,743
Немонинка	0,59	0,21	Czarna	0,43	0,11	0,824

Для дальнейших расчётов будет использоваться следующее уравнение линейной регрессии:

$$Q_{iv}(Q_o) = kr \cdot Q_o + b, \quad (1)$$

где kr и b – параметры регрессии; Q_o – переменная функции.

Это уравнение можно рекомендовать для практических расчётов, если выполнены условия гидрологического подобия (табл. 1 и 3) и четыре неравенства: 1. Количество совместных наблюдений n_i не менее 10 – выполнено; 2. Коэффициент парной корреляции r_{ia} не менее 0,7 – выполнено; 3. Отношение коэффициента парной корреляции r_{ia} к погрешности его вычисления не менее 2; 4. Отношение коэффициента регрессии kr к погрешности его вычисления не менее 2.

Найдём коэффициенты уравнения линейной регрессии, погрешность вычисления коэффициента парной корреляции r_{ia} и коэффициента регрессии.

Найдём коэффициенты уравнения линейной регрессии при помощи встроенного оператора MathCAD, в котором степень полинома регрессии равна 1:

$$\text{regress}(Q_a, Q_i, 1). \quad (2)$$

Далее рассчитаем погрешность вычисления коэффициента парной корреляции r_{ia} и коэффициента регрессии kr по формулам:

$$\sigma_r = \frac{1 - r_{ia}^2}{\sqrt{n_i - 1}}, \quad (3)$$

$$\sigma_k = \frac{\sigma_i}{\sigma_a} \cdot \sqrt{\frac{1 - r_{ia}^2}{n_i - 1}}, \quad (4)$$

где n_i – число членов гидрологического ряда.

Все полученные данные запишем в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты уравнения линейной регрессии и отношение коэффициентов парной корреляции r_{ia} и коэффициентов регрессии kr к погрешности их вычислений

Название рек	kr	b	σ_r	σ_k	r_{ia}/σ_r	kr/σ_k
Злая – Water of Leith	1,329	-0,617	0,139	0,374	5,512	3,555
Оса – Jagst	0,280	0,156	0,145	0,082	5,192	4,422
Матросовка – Warta	0,422	69,017	0,149	0,127	4,978	3,331
Немонинка – Czarna	1,634	-0,118	0,107	0,375	7,696	4,361

Как видно из табл. 4, неравенства 3 и 4 также выполнены, и полученные уравнения можно рекомендовать для практических расчётов. Запишем полученные уравнения в табл. 5.

Таблица 5

Уравнения линейной регрессии, связывающие среднегодовые расходы воды исследуемых гидрологических рядов (Q_i , м³/с) и гидрологических рядов рек аналогов (Q_a , м³/с)

Название рек	Уравнение линейной регрессии
Злая – Water of Leith	$Q_{iv}(Q_o) = 1,329 \cdot Q_o - 0,617$
Оса – Jagst	$Q_{iv}(Q_o) = 0,280 \cdot Q_o + 0,156$
Матросовка – Warta	$Q_{iv}(Q_o) = 0,422 \cdot Q_o + 69,017$
Немонинка – Czarna	$Q_{iv}(Q_o) = 1,634 \cdot Q_o - 0,118$

Следующим шагом необходимо найти границы доверительных интервалов для уравнений линейной регрессии.

Среднее квадратическое отклонение результатов измерений расходов воды в исследуемых гидрологических рядах от линейной зависимости $Q_{iv}(Q_o)$ находим по формуле (м³/с):

$$D = \sqrt{\frac{1}{ni - 2} \cdot \sum_{i=1}^{ni} (Q_i - Q_{iv}(Q_a))^2} \quad (5)$$

Сумму квадратов отклонения результатов измерений расходов воды в частях гидрологических рядов рек аналогов от среднего выборочного значения получим по формуле (м³/с):

$$SS = \sum_{i=1}^{ni} (Q_{a_i} - Q_{as})^2 \quad (6)$$

Нижний и верхний доверительный интервал для уравнений линейной регрессии вычислим через следующие функции ($t_\gamma = 1.96$):

$$\phi_l(x) = Q_{iv}(x) - t_\gamma \cdot D \cdot \sqrt{\frac{1}{ni} + \frac{(x - Q_{as})^2}{SS}} \quad (7)$$

$$\phi_u(x) = Q_{iv}(x) + t_\gamma \cdot D \cdot \sqrt{\frac{1}{ni} + \frac{(x - Q_{as})^2}{SS}} \quad (8)$$

Построим графики, связывающие среднегодовые расходы воды исследуемых гидрологических рядов (Q_i , м³/с) и гидрологических рядов рек аналогов (Q_a , м³/с) (рис. 2).

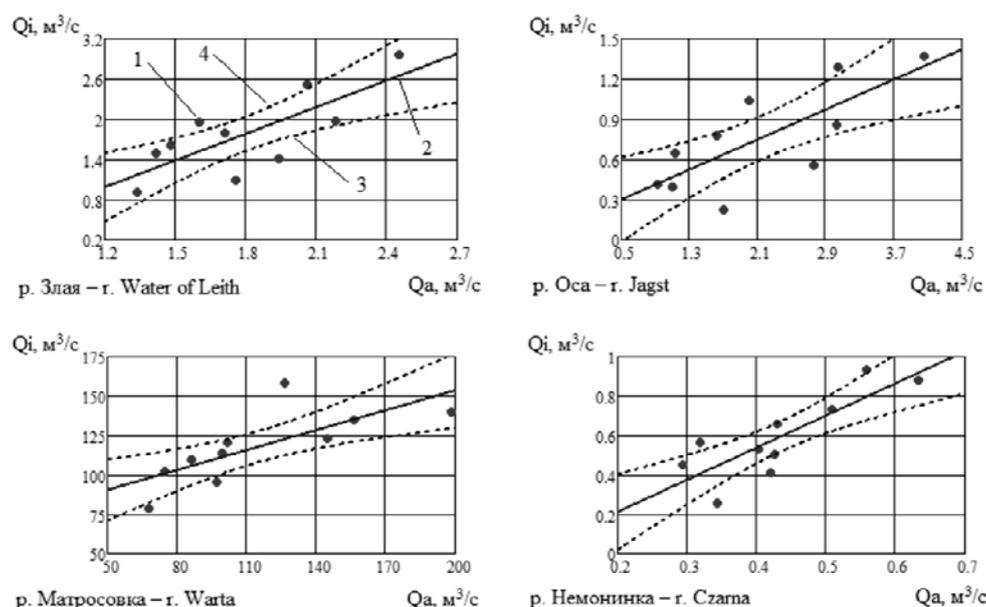


Рис. 2. Графики связи между среднегодовыми расходами воды исследуемых гидрологических рядов (Q_i , м³/с) и гидрологических рядов рек аналогов (Q_a , м³/с)
 Условные обозначения: 1 – данные совместных наблюдений за 10 лет; 2 – уравнение линейной регрессии; 3 и 4 – нижний и верхний доверительный интервал.

Сделав все необходимые построения, можно приступить к восстановлению гидрологических рядов. Генерация случайной составляющей, распределённой по нормальному закону, осуществляется при помощи встроенного оператора MathCAD:

$$\psi = rnorm(n, \mu, \sigma), \quad (9)$$

где n – число членов гидрологического ряда реки-аналога (Water of Leith ($n = 31$); Jagst ($n = 55$); Warta ($n = 31$); Czarna ($n = 41$)); σ – среднее квадратическое отклонение ($\sigma = 1$); μ – математическое ожидание ($\mu = 0$).

Расчёт восстановленного гидрологического ряда произведём по формуле ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$Qv_i = Qiv(Q_i) + \psi_i \cdot \sigma \cdot \sqrt{1 - ria^2}, \quad (10)$$

где Q – гидрологический ряд реки аналога ($\text{м}^3/\text{с}$).

Восстановленные гидрологические ряды исследуемых рек и ряды рек-аналогов выглядят следующим образом (рис. 3).

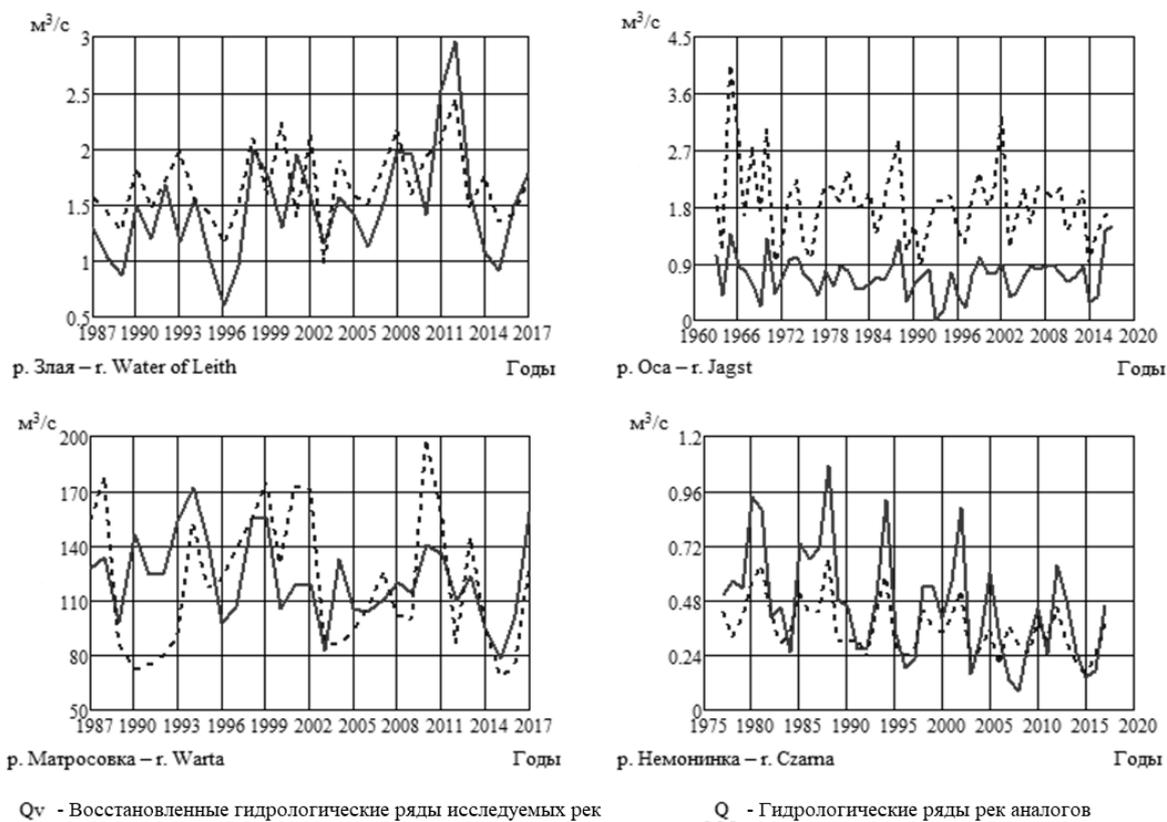


Рис. 3. Восстановленные гидрологические ряды исследуемых рек и ряды рек аналогов

После восстановления полные гидрологические ряды среднегодовых расходов воды исследуемых рек (Qv , $\text{м}^3/\text{с}$) выглядят следующим образом (рис. 4).

Получив восстановленные гидрологические ряды, нужно обосновать их достаточную продолжительность и однородность с целью расчёта необходимых прикладных гидрологических характеристик [11-12]. Проверка достаточности продолжительности периодов наблюдений осуществлена при помощи относительной погрешности выборочного среднего расхода. Для реки Злая он составил 6,17 %, реки Оса 7,05 %, реки Матросовка 3,53 %, реки Немонинка 9,05 %. Продолжительность периода наблюдений считается достаточной, если относительная средняя квадратическая погрешность не превышает 10 % для годового и сезонного стоков. Данному критерию отвечают все рассматриваемые реки, из чего следует вывод, что продолжительность периода наблюдений на исследуемых водных объектах является достаточной.

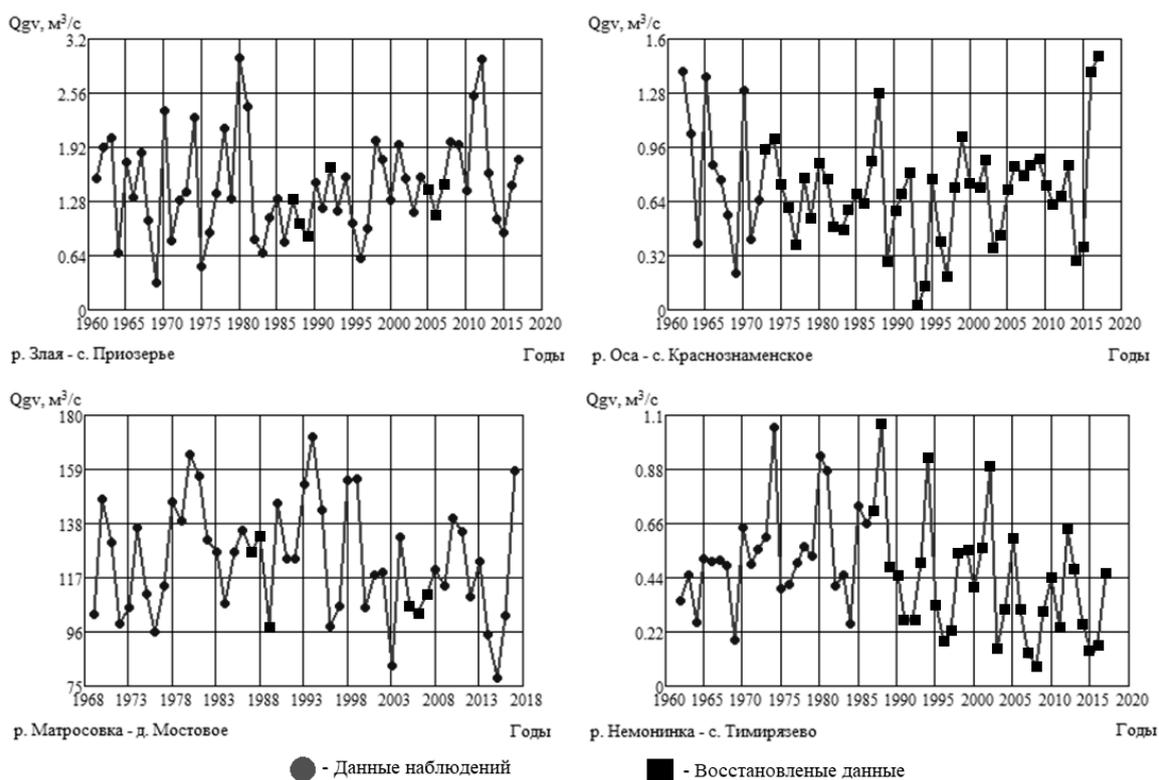


Рис. 4. Полные восстановленные гидрологические ряды среднегодовых расходов воды исследуемых рек

Для проверки однородности гидрологических рядов среднегодовых расходов использовались критерии Стьюдента и Фишера. Однородность восстановленных рядов подтверждается гипотезами о равенстве дисперсий и математических ожиданий двух частей ряда, для всех исследуемых рек, кроме реки Немонинка, для нее гипотеза о равенстве математических ожиданий двух частей ряда отвергается. Таким образом, гидрологические ряды могут считаться однородными, так как не отвергается хотя бы одна гипотеза, а в большинстве случаев они не отвергаются обе.

Поскольку критерии продолжительности и однородности гидрологического ряда соблюдены можно приступать к дальнейшим расчетам. В инженерно-практической, водохозяйственной и научно-прикладной отрасли основными гидрологическими показателями водотока можно назвать: средний многолетний расход (Q_s , м³/с); среднегодовой расход заданной обеспеченности ($Q_{gv_p\%}$, м³/с); коэффициент вариации и асимметрии, а также их отношение (C_v , C_s и O_t). Эти параметры используются во множестве гидрологических расчётов, подборе инженерных решений, характеристике речного стока, научных исследованиях и т.д.

Для определения расходов любой заданной обеспеченности, построим кривые обеспеченности среднегодовых расходов. Они будут построены при помощи распределения Крицкого–Менкеля (трёхпараметрическое гамма-распределение) (рис. 5).

Таблица 6

Основные гидрологические характеристики водотоков осушаемых сельскохозяйственных полей земель Славского района Калининградской области

Название реки	C_v	C_{ve}	C_s	C_{se}	O_t	O_e	Q_s	$Q_{gv1\%}$	$Q_{gv5\%}$	$Q_{gv90\%}$	$Q_{gv95\%}$
Злая	0,40	0,40	0,58	0,57	1,46	1,44	1,45	3,01	2,49	0,76	0,61
Оса	0,46	0,48	0,40	0,18	0,88	0,38	0,71	1,50	1,30	0,26	0,17
Матросовка	0,18	0,18	0,16	0,25	0,88	1,38	123,83	178,79	161,51	96,23	89,24
Немонинка	0,49	0,49	0,71	0,77	1,44	1,56	0,47	1,13	0,90	0,20	0,15

При помощи теоретических кривых обеспеченности найдем расход с различной обеспеченностью ($Q_{gv1\%}$, $Q_{gv5\%}$, $Q_{gv90\%}$, $Q_{gv95\%}$, m^3/c), а также коэффициенты вариации, асимметрии и их отношения для каждой исследуемой реки (C_v , C_s и O_e). Все полученные характеристики сведены в табл. 6.

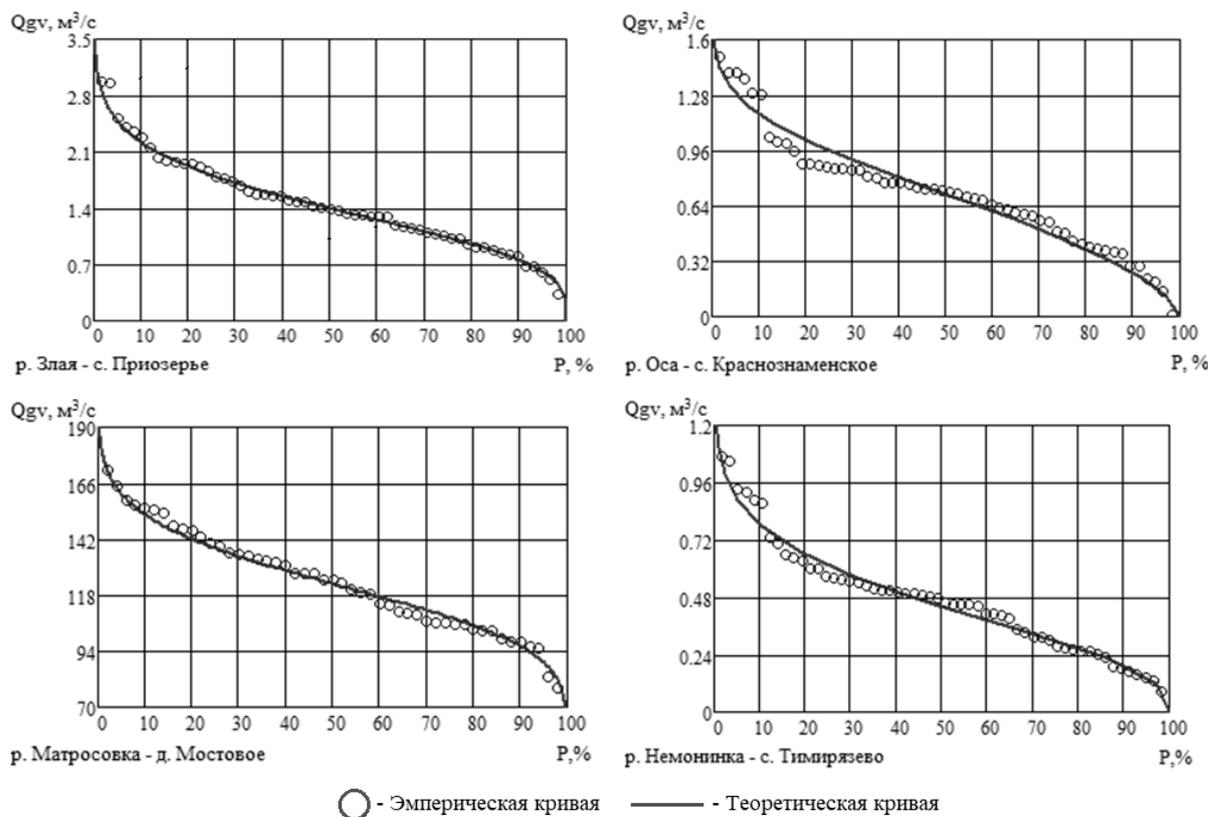


Рис. 4. Кривые обеспеченности среднегодовых расходов

Заключение

В работе были восстановлены данные о среднегодовых расходах воды в исследуемых реках Славского района Калининградской области за следующие года: р. Злая – с. Приозерье (1987–1989 гг.; 1992 г.; 2005–2007 гг.); р. Оса – с. Краснознаменское (1973–2017 гг.); р. Матросовка – д. Мостовое (1987–1989 гг.; 2005–2007 гг.); р. Немонинка – с. Тимирязево (1987–2017 гг.).

Теоретические кривые обеспеченности среднегодовых расходов, построенные по трехпараметрическому гамма-распределению, хорошо согласуются с эмпирическими кривыми обеспеченности. Теоретическая кривая обеспеченности позволяет вычислять среднегодовой расход любой заданной обеспеченности.

В результате исследования получены ключевые гидрологические характеристики некоторых водотоков осушаемых сельскохозяйственных полей Славского района Калининградской области. Коэффициенты вариации и асимметрии удовлетворяют условиям $C_v < 0,6$ и $C_s < 1,0$ что позволяет определять их по формулам без введения поправок [11]. Коэффициенты вариации и асимметрии трехпараметрического гамма-распределения практически не отличаются от эмпирических значений. Исключением можно считать реку Оса, где коэффициенты асимметрии различаются в 2 раза. Сами же коэффициенты вариации и асимметрии относительно низкие, что говорит о стабильном поведении и об умеренной положительной асимметрии гидрологических рядов среднегодовых расходов. Всё вышесказанное в свою очередь существенно упрощает прогнозирование их поведения, и повышает степень доверия к средним многолетним расходам рек. Полученные коэффициенты вариации и асимметрии, а также полученные на их основе районные соотношения позволят помимо прочих направлений, более точно генерировать гидрологические ряды среднегодовых расходов при недостаточности или отсутствии данных гидрометрических наблюдений по другим водотокам исследуемой территории.

С целью проведения необходимых расчетов и построений были собраны все имеющиеся данные о гидрометрических наблюдениях за водотоками Славского района, на основе которых были составлены гидрологические ряды среднегодовых расходов. Вопрос о беспрепятственном доступе к гидрологической информации по Калининградской области в целом остается открытым. Подобную работу необходимо сделать по всем районам региона, не смотря на трудоемкий сбор и обработку массивов данных. Особое внимание стоит уделить малым водотокам, поскольку данные о них распространены в меньшем количестве источников.

Хорошим примером является работа профессора И.А. Шикломанова, который в рамках «Международной гидрологической программы ЮНЕСКО» в 1999 г., представил данные наблюдений за ежемесячным и годовым речным стоком с более чем с 2000-х гидрологических станций. Все они хранятся в электронном виде на портале ЮНЕСКО. Оцифровка старых и новых материалов это важное направление для их сохранения и упрощения доступа к ним.

Эти действия в дальнейшем должны повысить гидрологическую осведомленность заинтересованных лиц, что важно в эпоху глобального спроса на водные ресурсы. Геоэкологический аспект устойчивого развития региона в существенной степени определяется рациональным использованием поверхностных вод, что невозможно без адекватной информационной основы. Также стоит отметить высокую перспективу этих исследований в проводимой автором оценке загрязнения и геоэкологического состояния исследуемых водотоков.

Благодарности

Ознакомление с материалами «Государственного гидрологического института» состоялось в рамках «Проекта повышения конкурентоспособности ведущих Российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров 5-100».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Н.С. Оценка геоэкологической ситуации в речных бассейнах Калининградской области с применением геоинформационных технологий: дис. ... канд. геогр. наук. Калининград, 2011. С. 6-14.
2. Белов Н.С., Зотов С.И. Оценка гидроэкологического состояния речных систем Калининградской области // Вестн. Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2008. № 1. С. 6-16.
3. Домнин Д.А. Геоинформационная система для индикаторов геоэкологической оценки состояния водосборных бассейнов Калининградской области // Естественные и технические науки. 2014. № 11-12. С. 193-198.
4. Нагорнова Н.Н. Геоэкологическая оценка состояния малых водотоков Калининградской области: дис. ... канд. геогр. наук. Калининград, 2012. С. 8-19.
5. Спириин Ю.А., Ахмедова Н.Р. К вопросу о состоянии водоприемников осушительной мелиоративной сети в Калининградской области // Вестн. молодёжной науки: сб. науч. ст. Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. С. 391-393.
6. Результаты натурных исследований малых водотоков на мелиорированных землях региона / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов, Л.В. Маркова, А.А. Смирнова // Вода: химия и экология. 2013. № 7. С. 18-26.
7. Спириин Ю.А. Анализ внутригодового распределения стока рек Славского района Калининградской области // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44. № 2. С. 231-242. DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-231-242.
8. Бассейны рек Немана, Преголи и Вислы // Гидрологический ежегодник 1961 г. Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. Т. 1. Вып. 5, 6. 198 с.
9. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1990–2004 г. Реки и каналы. Бассейны рек Калининградской области. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2012. 192 с.
10. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 28.08.2020).
11. СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик (одобрен для применения в качестве нормативного документа постановлением Госстроя России № 218 от 26 декабря 2003 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035578> (дата обращения: 28.08.2020).
12. Наумов В.А. Результаты статистического анализа региональных гидрологических и климатических рядов // Вестн. науки и образования Северо – Запада России. 2016. Т.2. № 3. С. 1-6.
13. Наумов В.А. Методы обработки гидрологической информации. Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2014. С. 99-103.

14. A dynamical statistical framework for seasonal streamflow forecasting in an agricultural watershed / Louise J. Slater, Gabriele Villarini, A. Allen Bradley, Gabriel A. Vecchi // *Climate Dynamics*. 2017. Vol. 53. P. 7429-7445.
15. Evaluation of a typical hydrological model in relation to environmental flows / Martin Olsen, Lars Troldborg, Hans Joergen Henriksen et al // *Journal of Hydrology*. 2013. Vol. 507. P. 52 - 62.
16. Федеральный институт гидрологии Германии (The German Federal Institute of Hydrology). URL: <https://www.bafg.de/> (дата обращения: 28.08.2020).
17. Министерство экологии, устойчивого развития и энергетики Франции (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie). URL: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/> (дата обращения: 28.08.2020).
18. Центр экологии и гидрологии Соединённого Королевства (UK Centre for Ecology & Hydrology). URL: <https://www.ceh.ac.uk/> (дата обращения: 28.08.2020).
19. Глобальный центр данных по стоку (The Global Runoff Data Centre). URL: <https://portal.grdc.bafg.de/applications/public.html?publicuser=PublicUser#dataDownload/Stations> (дата обращения: 28.08.2020).
20. Национальный архив речного стока (National River Flow Archive). URL: <https://nrfa.ceh.ac.uk/data/search> (дата обращения: 28.08.2020).
21. Гидробанк (Hydro Banque). URL: <http://www.hydro.eaufrance.fr/> (дата обращения: 28.08.2020).
22. Государственный водный реестр. URL: <http://www.textual.ru/gvr> (дата обращения: 28.08.2020).

Поступила в редакцию 01.06.2021

Спирин Юрий Александрович, аспирант Института природопользования, территориального развития и градостроительства
 ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»
 236022, Россия, г. Калининград, ул. Зоологическая, 2
 E-mail: spirin1234567890@rambler.ru

Yu.A. Spirin

HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF RIVER RUNOFF IN GEOECOLOGICAL STUDIES OF SURFACE WATER IN THE SLAVSKY DISTRICT, KALININGRAD REGION

DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-2-185-197

An important issue in geoeological studies of watercourses can be considered the presence of integral and continuous hydrological series. On their basis, most of the hydrological calculations and structures are made, without which high-quality and rational water use is impossible. Unfortunately, in the Kaliningrad region, there are a number of difficulties with obtaining a complete set of recorded results of hydrological monitoring carried out over watercourses. The aim of the work was to collect hydrological information and calculate the main hydrological characteristics of the river flow of some watercourses in the Slavsky region. All the available data on hydrometric observations of the rivers of the considered territory were collected, on the basis of which hydrological series of average annual discharges were compiled. These rivers are: Zlaya, Osa, Matrosovka and Nemoninka. The missing data in the hydrological series of the average annual water discharge of the rivers under consideration were restored. The curves of the provision of average annual expenditures have been built according to the reconstructed data, and the average long-term expenditures, coefficients of variation and coefficients of asymmetry of the studied water bodies have been calculated. The entire methodology was based on the current set of rules for hydrological calculations. The results obtained can play an important role in further geoeological studies of watercourses in the Slavsk region, planning their use and in various project activities to develop water use.

Keywords: watercourses, geoeological research, average long-term consumption, polder, security curve, hydrological series, Slavsky district, Kaliningrad region.

REFERENCES

1. Belov N.S. *Ocenka geoeologicheskoy situacii v rechnyh bassejnah Kaliningradskoj oblasti s primeneniem geoinformacionnyh tekhnologij* [Assessment of the geoeological situation in the river basins of the Kaliningrad region using geoinformation technologies], Cand. Geog. Sci. diss., Kaliningrad, 2011, pp. 6-14 (In Russ.).
2. Belov N.S., Zotov S.I. [Hydroecological condition of rivers in the Kaliningrad region], in *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennye i medicinskie nauki*, 2008, no. 1, pp. 6-16 (In Russ.).
3. Domnin D.A. [Geoinformation system for geoeological assessment indicators of Kaliningrad oblast catchment conditions], in *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 11-12, pp. 193-198 (In Russ.).

4. Nagornova N.N. *Geoekologicheskaya ocenka sostoyaniya malyh vodotokov Kaliningradskoy oblasti* [Geoecological assessment of the state of small watercourses in the Kaliningrad region], Cand. Geog. Sci. diss., Kaliningrad, 2012, pp. 8-19 (In Russ.).
5. Spirin Yu.A., Ahmedova N.R. [To the issue of the condition of the drainage network in the Kaliningrad region], in *Sborn. nauch. st. "Vestnik molodyozhnoj nauki"*, Kaliningrad: FGBOU VPO «KGTU», 2014, pp. 391-393 (In Russ.).
6. Velikanov N.L., Naumov V.A., Markova L.V., Smirnova A.A. [Results of natural researches of small water flows on reclaimed soils], in *Voda: himiya i ekologiya*, 2013, no. 7, pp. 18-26 (In Russ.).
7. Spirin Yu.A. [Analysis of the intra-annual distribution of river flow in the Slavsky district of the Kaliningrad region], in *Regional geosystems*, 2020, vol. 44, no 2, pp. 231-242. DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-231-242 (In Russ.).
8. *Basseyny rek Nemana, Pregoli i Visly* [Basins of the Neman, Pregoli and Vistula rivers], in *Gidrologicheskiy ezhegodnik 1961 g.*, Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1963, vol.1, iss. 5, 6, pp. 198 (In Russ.).
9. *Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushy 1990-2004 g. Reki i kanaly. Basseyny rek Kaliningradskoy oblasti* [State Water Cadastre. Annual data on the regime and resources of land surface waters 1990-2004 Rivers and canals. River basins of the Kaliningrad region], St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2012, pp. 192 (In Russ.).
10. *Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob"ektov* [Automated information system of state monitoring of water bodies], Available at: <https://gmvo.skniivh.ru/> (accessed: 28.08.2020) (In Russ.).
11. *SP 33-101-2003 Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik (odobren dlya prime-neniya v kachestve normativnogo dokumenta postanovleniem Gosstroya Rossii № 218 ot 26 dekabrya 2003 g.)* [SP 33-101-2003 Determination of the main calculated hydrological characteristics (approved for use as a regulatory document by the decree of the Gosstroy of Russia No. 218 of December 26, 2003.)], Available at: <http://docs.cntd.ru/> (accessed: 28.08.2020) (In Russ.).
12. Naumov V.A. [Results of statistical analysis of the regional hydrological and climatic series], in *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo – Zapada Rossii*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 1-6 (In Russ.).
13. Naumov V.A. *Metody obrabotki gidrologicheskoy informatsii* [Hydrological information processing methods], Kaliningrad: FGOU VPO "KGTU" Publ., 2014, pp. 99-103 (In Russ.).
14. Louise J. Slater, Gabriele Villarini, A. Allen Bradley, Gabriel A. Vecchi. A dynamical statistical framework for seasonal streamflow forecasting in an agricultural watershed, in *Climate Dynamics*, 2017, vol. 53, pp. 7429-7445.
15. Martin Olsen, Lars Troldborg, Hans Joergen Henriksen et al. Evaluation of a typical hydrological model in relation to environmental flows, in *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 507, pp. 52-62.
16. *Federal'nyy institut gidrologii Germanii* [The German Federal Institute of Hydrology], Available at: <https://www.bafg.de/> (accessed: 28.08.2020).
17. *Ministerstvo ekologii, ustoychivogo razvitiya i energetiki Frantsii* [Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie], Available at: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/> (accessed: 28.08.2020).
18. *Tsentr ekologii i gidrologii Soedinennogo Korolevstva* [UK Centre for Ecology & Hydrology], Available at: <https://www.ceh.ac.uk/> (accessed: 28.08.2020).
19. *Global'nyy tsentr dannyykh po stoku* [The Global Runoff Data Centre], Available at: <https://portal.grdc.bafg.de/applications/public.html?publicuser=PublicUser#dataDownload/Stations> (accessed: 28.08.2020).
20. *Natsional'nyy arkhiv rechnogo stoka* [National River Flow Archive], Available at: <https://nrfa.ceh.ac.uk/data/search> (accessed: 28.08.2020).
21. *Gidrobank* [Hydro Banque], Available at: <http://www.hydro.eaufrance.fr/> (accessed: 28.08.2020).
22. *Gosudarstvennyy vodnyy reestr* [State water register], Available at: <http://www.textual.ru/gvr> (accessed: 28.08.2020) (In Russ.).

Received 01.06.2021

Spirin Yu.A., postgraduate student of the Institute of Nature Management,
Territorial Development and Urban Planning
Immanuel Kant Baltic Federal University
Zoologicheskaya st., 2, Kaliningrad, Russia, 236022
E-mail: spirin1234567890@rambler.ru