АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НОРМЫ СТОКА НЕИЗУЧЕННЫХ РЕК (НА ПРИМЕРЕ БАСЕЙНА РЕКИ АМУР В ПРЕДЕЛАХ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ)

Д.А. Шаликовский^{1,2}, В.Н. Заслоновский^{1,2}, А.В. Шаликовский^{1,2}

E-mail: vostokniivh@mail.ru

¹ ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Восточный филиал,

г. Чита, Россия

² ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»,

г. Чита, Россия

АННОТАЦИЯ: В статье представлен подход к определению нормы стока неизученных рек в зависимости от их порядка по А. Шайдеггеру и соответствующего зонирования. Показано, что использование единой зависимости нормы стока от порядка реки дает значительные погрешности для небольших водотоков. Это связано с тем, что аппроксимирующая функция всего массива данных фактически отражает закономерности только для гидрологических постов с большими значениями нормы стока.

Для территории Амурского бассейна в пределах Забайкальского края выделено пять районов, в пределах которых зависимости нормы стока малых и средних рек имеют значения коэффициента корреляции от 0,95 до 0,97. Разработана вспомогательная схема зонирования рассматриваемой территории, позволяющая упростить определение порядка реки. Предлагаемая схема определения нормы стока включает следующие операции: определение района по вспомогательной схеме – вычисление порядка реки – определение района по основной схеме – вычисление нормы стока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные ресурсы, водосбор, норма стока, порядок реки, гидрологические расчеты, районирование, р. Амур.

При подготовке разрешительной документации на водопользование, при проектировании гидротехнических сооружений и водохозяйственных объектов, обосновании мер по охране водных объектов зачастую приходится определять гидрологические характеристики для неизученных водотоков. Неверные расчеты могут привести к значительным экономическим потерям и сверхнормативным воздействиям на окружающую среду. Так, в 2018 г. от наводнения в Забайкальском крае пострадало 36 мостов (22 снесено), наблюдались разрушения дамб и других гидротехнических сооружений.

© Шаликовский Д.А., Заслоновский В.Н., Шаликовский А.В., 2020

Снижение точности расчетов во многом обусловлено сокращением сети гидрологических постов, что усложняет подбор рек-аналогов, а также не позволяет уточнять карты изолиний стока и другие справочные материалы, разработанные 35 и более лет назад [1]. Современные справочные издания, такие как «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество» и «Основные гидрологические характеристики рек бассейнов Камы, Верхней и Нижней Волги» не содержат материалов, которые могут использоваться при гидрологических расчетах. В связи с этим, в последнее время наметилась тенденция разработки альтернативных методов анализа стока неизученных рек: метеорологические параметры – сток [2, 3 и др.]; морфометрические характеристики бассейнов рек – сток [4, 5 и др.]. Использование этих и других косвенных методов является перспективным для значительной части территории Забайкальского края, в пределах которого имеются климатические зоны и их пояса от сухостепных до гольцово-тундровых, а значительные территории не охвачены гидрологическими наблюдениями.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реки Забайкальского края принадлежат к трем крупным бассейнам – бассейну р. Амур (55 % территории), бассейну р. Лены (30,4 %) и оз. Байкал, являющемуся подбассейном р. Енисей (13,3 %) [6]. Исследуемая территория занимает 243,5 тыс. км² и охватывает водосборы рек Шилка и Аргунь, образующих Амур, а также область стока верхнего 46-километрового участка р. Амур. В соответствии с водохозяйственным районированием к Амурскому бассейну относится и бессточная область в южной части Забайкальского края (около 1,3 % территории).

Основная часть рассматриваемой территории расположена в таежной природной зоне, которая подразделяется на подзоны средней и южной тайги. Зона степей охватывает водосбор Торейских озер, южные части бассейнов рек Онон и Аргунь, а также междуречье рек Куэнга и Нерча. Лесостепная зона с размытыми границами занимает промежуточное положение между тайгой и степями.

Климат исследуемой территории резко континентальный: зима – холодная и продолжительная, лето – теплое и короткое. Распределение осадков неравномерное. Наиболее засушливая область – сухостепная зона южнее рек Борзя и Онон (250–300 мм/год). Более половины площади является полусухой с годовым количеством осадков от 300 до 500 мм. Основные хребты относятся к полувлажной зоне с количеством осадков от 500 до 700 мм в год (до 1000 мм в южной части Яблонового хребта) [7]. Количество осадков в многоводные годы по всей территории в 2–3 раза превышает осадки за маловодные годы.

Питание рек осуществляется преимущественно за счет поверхностных вод с преобладающим дождевым питанием. Другие источники питания большинства рек незначительны – снеговое от 5 до 14 %, подземное от 5 до 16–18 % (в среднем – 11 %) [6]. По условиям водного режима реки относятся к дальневосточному типу. В теплый период в среднем наблюдается 4–6 паводков, а на малых реках – до 6–9 [8]. Примеры характерных гидрографов стока приведены на рис. 1.

Разнообразие ландшафтов и климатических условий позволяет выделить пять гидрологических районов, средние характеристики которых значительно различаются: средняя высота – от 700 до 1300 м БС; густота речной сети – от 0,13 до 0,55 км/км²; модуль стока – от 0,11 до 5,21 (л/с)/км² [8]. Еще более значительно различаются аналогичные характеристики 21 подрайона, на которые подразделяются гидрологические районы.

Исследуемая территория в целом является малоизученной: в разное время здесь действовало 144 гидрологических поста, а в настоящее время – 75, из которых 16 являются уровенными (рис. 2). Площадь водосбора до 200 км² имеют три гидрологических поста (табл. 1), расположенных вблизи г. Читы, до 500 км² – 4 створа наблюдений. Это создает значительные трудности при выборе рек-аналогов для решения многих гидрологических задач, т. к. подавляющее большинство водопропускных сооружений и объектов горной отрасли расположено на малых водотоках. Практически отсутствуют гидрологические посты в горных районах (выше 900 м БС – 1 створ наблюдений, выше 800 м БС – 4 поста). Действующая сеть мониторинга распределена очень неравномерно: в трех из 21 гидрологического подрайона посты отсутствуют, в одном насчитывается 14 стоковых и 2 уровневых пунктов наблюдений.

Таблица 1. Распределение гидрологических постов по основным географическим признакам

Показатель	Диапазон	Число постов		
		действующих	закрытых	всего
Площадь водосбора, км ²	< 200	3	11	14
	200 – 2000	26	28	54
	> 2000	46	30	76
Высота над уровнем моря, м	< 600	33	44	77
	600 – 900	41	22	63
	> 900	1	3	4

Для данной работы использованы ряды гидрологических наблюдений на 58 действующих и 44 закрытых гидрометрических постах. Данные по закрытым пунктам наблюдений позволили добиться более равномерного распределения анализируемой сети по высоте, площади водосбора и территории, т. к. прекращение наблюдений нередко было обусловлено ликвидацией населенных пунктов в труднодоступных районах из-за оттока населения.

Для наиболее длинных рядов наблюдений (р. Шилка – г. Сретенск, р. Ингода – пос. Атамановка, р. Онон – ст. Оловянная, р. Урульга – ст. Урульга, р. Чита – г. Чита) выполнен статистический анализ их однородности

и синхронности [9]. Значения критериев Фишера и Стьюдента свидетельствуют о неоднородности рядов за полный период наблюдений, а коэффициенты парной корреляции – о их достаточной синхронности.

Выделение репрезентативного периода для расчета нормы годового стока производилось методом разностной интегральной кривой по гидропосту р. Шилка (г. Сретенск) [10], для которого имеется наиболее продолжительный ряд наблюдений. Установлено, что для вычисления нормы стока можно использовать периоды с 1942, 1962 или 1989 года (рис. 3). В связи с тем, что в 1942 г. практически не было гидрологических постов, а период с 1989 г. охватывает только один цикл водности, принято решение считать репрезентативным период 1962–2016 гг.

Рис. 3. Разностная интегральная кривая среднегодовых расходов воды на гидрологическом посту р. Шилка – г. Сретенск.

Распределение анализируемых гидрологических постов по продолжительности периода наблюдений представлено в табл. 2. Доля постов с наблюдениями, охватывающими весь репрезентативный период, составляет 45 % (46 пунктов), поэтому для остальных пунктов требовалось произвести удлинение рядов по рекам-аналогам. Следует отметить, что многие ряды наблюдений начинались и заканчивались в разные годы, но самое большое число постов было закрыто в период с 1988 по 1997 гг. (22,5 % от числа анализируемых).

Таблица 2. Распределение гидрологических постов по продолжительности наблюдений

Продолжительность периода наблюдений, лет	менее 10	10–19	20–29	30–39	40–49	50–59	60–69	70 и более	Итого
Количество гидрологических постов	6	14	13	8	9	11	15	26	102

Для каждого из 102 гидрологических постов получены средние многолетние расходы воды, приведенные к репрезентативному периоду 1962–2016 гг., которые можно считать нормой годового стока Q_0 . Эти результаты являются близкими к естественным условиям в связи с незначительным влиянием антропогенных факторов из-за отсутствия водохранилищ выше всех створов наблюдений и небольшим объемом безвозвратного забора поверхностных вод.

Порядок каждой реки определялся в створах наблюдений по формуле А. Шайдеггера [11]:

$$N_{\text{ш}} = 1 + \log_2 P, \quad (1)$$

где P – количество рек первого порядка в речном бассейне выше створа определения $N_{\text{ш}}$.

Преимущество подхода А. Шайдеггера заключается в постепенном возрастании порядка реки по мере впадения в нее водотоков. При использовании других методов порядок реки имеет постоянное значение [12 и др.] или изменяется дискретно [13 и др.] (рис. 4).

В качестве притоков первого порядка в формуле (1) приняты водотоки длиной до 10 км, сведения о числе которых приводятся в справочнике [14]. С этой целью:

- для всех рек, расположенных выше анализируемого створа по графу речного бассейна, вычислялась сумма притоков длиной до 10 км;
- по топографическим картам (в отдельных случаях – по пропорциональным соотношениям) определялось число притоков длиной до 10 км, впадающих в рассматриваемую реку выше анализируемого створа;
- искомое число P определялось путем суммирования двух указанных выше величин.

В результате исследований определены порядки рек в створах каждого из 102 анализируемых гидрологических постов. Это позволило создать соответствующую базу данных, фрагмент которой представлен в табл. 3.

Таблица 3. Гидрологические данные в створах наблюдений р. Ингода

Река	Пост	Период наблюдений, год	Площадь водосбора F , км ²	Отметка нуля поста, м БС	Порядок $N_{\text{ш}}$	Норма стока Q_0 , м ³ /с	Модуль стока M_0 , л/(с/км ²)
Ингода	Грязи*	1957–1970	535	1245,55	8,00	7,67	14,34
	Дешулан	1945–2016	6130	808,19	11,04	46,79	7,63
	Улеты	1936–2016	12500	735,52	12,01	69,89	5,59
	Атамановка	1899–2016	22000	630,10	12,43	84,38	3,84
	Тарская*	1976–2016	32700	570,95	12,88	100,68	3,08
	Красноярково	1941–2016	37000	510,06	12,98	114,25	3,09

Примечание: * – норма и модуль стока определены с использованием аналогов.

Рис. 4. Схемы установления порядков рек: а – по Р. Хортону [12], б – по А. Шейдеггеру [11].

В результате статистического анализа из рассмотрения исключено два пункта наблюдений: р. Ульдза-Гол расположена в обширной бессточной области, основная часть которой находится на территории Монголии; наличие единственного гидрологического поста (с. Соловьевск) не позволяет выявить закономерности; р. Хила (с. Ага) зарегулирована множеством степных озер, сток из которых может отсутствовать в течение нескольких лет. Таким образом, окончательные результаты исследований основаны на данных наблюдений на 100 гидрологических постах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка гидрологических данных по территории Амурского бассейна Забайкальского края позволила получить следующую зависимость для нормы стока (рис. 5):

$$Q_0 = 0,0179 \cdot e^{0,691 \cdot N_{\text{ш}}} \quad (R = 0,97). \quad (2)$$

Рис. 5. Зависимость нормы стока от порядка реки
(пунктирная линия – зависимость из [15]).

Как следует из рис. 5, имеется существенное расхождение между (2) и зависимостью, полученной Н.И. Алексеевским и др. [15] для всего Амурского бассейна с аналогичным коэффициентом корреляции:

$$Q_0 = 0,024 \cdot e^{0,69 \cdot N_{ш}} \quad (R = 0,97). \quad (3)$$

На наш взгляд, это связано с тем, что при выводе (3) использовались данные по постам Забайкальского края со средним значением среднегогодового расхода около $20 \text{ м}^3/\text{с}$, а по остальной части бассейна р. Амур – около $240 \text{ м}^3/\text{с}$. Как известно, регрессионный анализ основан на минимизации суммы квадратов отклонений, аппроксимирующей функции от анализируемых данных, поэтому материалы по Забайкалью практически не влияют на результаты установления единой бассейновой зависимости [16].

Аналогичная ситуация наблюдается и при регрессионном анализе для всего массива данных по Забайкальскому краю: зависимость (2) в основном отражает закономерности для гидрологических постов с большими значениями нормы стока. Рассмотрение только створов рек с площадью водосбора до 2000 км^2 позволило получить новую зависимость:

$$Q_0 = 0,039 \cdot e^{0,582 \cdot N_{ш}} \quad (R = 0,85). \quad (4)$$

Более низкое значение коэффициента корреляции по сравнению с (2) свидетельствует о влиянии а зональных факторов на сток малых и средних рек. Таким образом, целесообразно отдельно рассматривать крупные реки для получения единой региональной зависимости, а для небольших водотоков производить районирование. Для анализируемой территории выделено пять районов (рис. 6, табл. 4) с различными значениями коэффициентов в экспоненциальной зависимости вида:

$$Q_0 = a \cdot e^{b \cdot N_{ш}}. \quad (5)$$

Рис. 6. Схема районирования по виду зависимости $Q_0 = f(N_{ш})$.

Таблица 4. Гидрологические районы в зависимости от нормы стока малых и средних рек

№ на рис. 5	Наименование	Параметры в зависимости (5)		Коэффициент корреляции
		a	b	
I	Даурский горно-таежный район	0,132	0,5009	0,97
II	Среднеингодинский лесостепной район	0,0088	0,7676	0,97
III	Нижнеингодино-Ундинский горно-таежный и лесостепной район	0,0256	0,6295	0,97
IV	Шилкинско-Нижнеагунско-Амазарский горно-таежный район	0,0485	0,592	0,95
V	Онон-Аргунский степной и лесостепной район	0,023	0,6044	0,95

Примечание: территория без номера – область внутреннего стока.

В связи с трудоемкостью определения порядка реки по А. Шейдеггеру, для массовых расчетов рекомендуется использовать эмпирические зависимости между порядком реки ($N_{ш}$) и площадью водосбора (F , км²). Предлагаемые зависимости получены для трех выделенных зон (рис. 7).

Рис. 7. Схема районирования для выбора зависимости $N_{ш} = f(F)$.

Для зоны 1:

$$N_{ш} = 1,42 \ln(F) - 2,37. \quad (6)$$

Для зоны 2:

$$N_{ш} = 2,064 \ln(F) - 8,51. \quad (7)$$

Для зоны 3:

$$N_{ш} = 1,625 \ln(F) - 2,98. \quad (8)$$

Для неизученных рек при отсутствии надежных аналогов предлагается следующий механизм расчета нормы стока:

– вычисляется порядок реки в анализируемом створе по (1) с использованием данных «Гидрологической изученности» [14] и картографических данных, либо по формулам (6–8) в зависимости от зоны на рис. 7;

– определяется район расположения исследуемого створа по схеме на рис. 6 и по формуле (5) вычисляется норма стока с использованием коэффициентов из табл. 4.

ВЫВОДЫ

В представленной работе предлагается рассматривать вопрос определения нормы стока от порядка реки по А. Шейдеггеру не по единой бассейновой или региональной зависимости, а на основании зонирования, учитывающего а зональные факторы формирования стока малых и средних рек.

Для территории бассейна р. Амур в пределах Забайкальского края выделено пять районов, для которых получены зависимости для вычисления нормы стока неизученных рек. Предложенные зависимости имеют высокую корреляцию с данными многолетних гидрологических наблюдений на малых и средних реках – значения коэффициента корреляции лежат в пределах от 0,95 до 0,97, когда единая зависимость для этих же гидропостов имеет коэффициент корреляции 0,85.

Для снижения трудоемкости определения порядков рек разработана вспомогательная схема районирования рассматриваемой территории и для каждой из трех зон получены зависимости порядков рек от площади водосбора.

Предварительные результаты исследований также свидетельствуют о возможности использования предлагаемого подхода для определения параметров минимального стока и для ориентировочного вычисления максимальных расходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 448 с.
2. Beck H.E., van Dijk A.I.J.M., de Roo A., Dutra E., Fink G., Orth R., Schellekens J. Global evaluation of runoff from 10 state-of-the-art hydrological models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017. Vol. 21. P. 2881–2903. DOI: 10.5194/hess-21-2881-2017.
3. Айзель Г.В., Белозёров Е.В., Курочкина А.С. Определение расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений: потенциал использования регионального сеточного реанализа речного стока // *Водное хозяйство России*. 2020. № 2. С. 83–101. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-6.
4. Алексеевский Н.И., Косицкий А.Г., Христофоров А.В. Фрактальные свойства речных систем и их использование в гидрологических расчетах // *Вестник Томского государственного университета*. 2013. № 371. С. 167–170.
5. Дегтярев С.Д. Порядок речной сети как системный параметр при оценке естественных водных ресурсов // *Модели и технологии природообустройства (региональный аспект)*. 2015. № 1. С. 23–25.
6. Заслоновский В.Н., Шаликовский А.В., Коннов В.И., Косарев С.Г., Соколов А.В., Шарапов Н.М., Черепанова Т.В., Манилюк Т.А., Шильникова Т.А., Капралов В.И. Водные ресурсы Читинской области: состояние, проблемы, пути решения. Чита: ЧитГТУ, 1998. 111 с.
7. География Забайкальского края: учеб. пос. / под ред. В.С. Кулакова. Чита: Экспресс-изд-во, 2009. 308 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 1. Верхний и Средний Амур (от истоков до с. Помпеевка) Л.: Гидрометеиздат, 1966. 782 с.
9. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определение их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.

10. Шаликовский Д.А. Подготовка гидрологической информации для корректного определения нормы речного стока // Молодежная научная весна: мат-лы XLIV науч.-практ. конф. молодых исследователей ЗабГУ. Чита: ЗабГУ, 2017. Ч. 4. С. 27–30.
11. Scheidegger A.E. Stochastic branching process and the law of stream orders // Water Resour. Res. 1966. Vol. 2. No. 2. P. 199–203.
12. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. М.-Л.: Изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.
13. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 238 с.
14. Гидрологическая изученность. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 1. Амур. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 488 с.
15. Алексеевский Н.И., Косицкий А.Г., Носань В.В., Христофоров А.В. Подобие рек и их систем // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 531–543. DOI: 10.7868/S0321059613060035.
16. Шаликовский Д.А. О проблемах в установлении закономерностей между стоковыми характеристиками и порядком реки на примере Забайкальского края // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: сб. статей XIX межд. науч.-практ. конф. 2019. Ч. 3. С. 39–42.

Для цитирования: Шаликовский Д.А., Заслоновский В.Н., Шаликовский А.В. Альтернативный подход к определению нормы стока неизученных рек (на примере бассейна р. Амур в пределах Забайкальского края) // Водное хозяйство России. 2020. № 6. С. 6–27.

Сведения об авторах:

Шаликовский Дмитрий Андреевич, младший научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Восточный филиал; аспирант, кафедра водного хозяйства, экологической и промышленной безопасности, ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», Россия, 672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30; e-mail: shalikovsky@gmail.com

Заслоновский Валерий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Восточный филиал; профессор, кафедра водного хозяйства, экологической и промышленной безопасности, ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», Россия, 672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30; e-mail: vnzaslonovskiy@mail.ru

Шаликовский Андрей Валерьевич, канд. техн. наук, доцент, директор, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Восточный филиал; профессор, кафедра водного хозяйства, экологической и промышленной безопасности, ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», Россия, 672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30; e-mail: vostokniivh@mail.ru

AN ALTERNATIVE APPROACH TO DETERMINING THE RATE OF RUNOFF OF UNSTUDIED RIVERS (THE AMUR RIVER BASIN IN THE TRANSBAIKAL KRAI AS A STUDY CASE)

Dmitry A. Shalikovskiy^{1,2}, Valeriy N. Zaslونovskiy^{1,2}, Andrey V. Shalikovskiy^{1,2}

E-mail: vostokniivh@mail.ru

¹*Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Eastern branch, Chita, Russia*

²*Transbaikal State University, Chita, Russia*

Abstract: The article presents an approach to determining the flow rate of unexplored rivers depending on their order according to A. Scheidegger and the corresponding zoning. It is shown that the use of a single dependence of the flow rate on the river order gives significant errors for small streams. This is because of the fact that approximation function of the entire data file actually reflects regularities only for hydrological stations with great values of the runoff norm.

For the territory of the Amur Basin within the Transbaikal cray, five regions have been identified, within which the dependences of the flow rate of small and medium rivers have values of the correlation coefficient from 0.95 to 0.97. An additional zoning scheme for the area under consideration has also been developed, which makes it possible to simplify the determination of the order of the river.

The proposed scheme of flow rate determination includes the following operations: determination of the area according to the additional scheme – calculation of the river order – determination of the area according to the main scheme – calculation of the flow rate.

Key words: water resources, watershed, flow rate, river order, hydrological design, zoning.

In the process of preparing of the permissive documentation for water use, in designing of hydraulic facilities and water/economic objects, and giving grounds for taking measures aimed at protection of water bodies we often are to determine hydrological characteristics on uninvestigated watercourses. Erroneous calculations might cause significant economic losses and super/normal impacts upon environment. Thus, in 2018 in Transbaikal Kray 36 bridges were damaged (22 of them were destroyed) by the flood, destruction of dams and other hydraulic facilities took place.

Decrease of the calculation reliability was mostly caused by decreasing the number of hydrological stations as this makes more difficult finding of the analog rivers and does not enable more precise definition of the runoff isoline maps and other reference materials developed more than 35 years ago [1]. Contemporary reference editions such as «Resources of surface waters and groundwater, their use and quality» and «Main hydrological characteristics of the Kama, Upper and Lower Volga basins' rivers» do not contain materials to be used in hydrological calculations. In this connection recently, a trend of development of alternative methods of the unstudied rivers runoff analysis have appeared, such as metrological parameters – runoff [2, 3 and others]; river basins morphometric

characteristics – runoff [4, 5 and others]. Use of these and other indirect methods is promising for the significant portion of the Transbaikal Kray territory, within which there are climatic zones from dry/steppe to loach/tundra zones while considerable territories are not covered by hydrological observations.

OBJECT AND METHODS OF RESEARCH

The Transbaikal Kray rivers belong to three major basins: the Amur River basin (55 % of the Kray territory), the Lena River basin (30.4 %) and the Lake Baikal basin, which is a sub-basin of the Yenisey River (13.3 %) [6]. The territory under study is 243.5 thousands of km² and includes catchments of the Shilka River and the Argun River that form the Amur River, as well as the area of the upper the Amur River 46-kilometer runoff area. In accordance with water /economic zoning, a blind drainage area in the southern part of Transbaikal Kray (about 1.3% of the territory) belongs to the Amur River basin, too.

The main part of the territory under consideration is located in the taiga natural zone, which is subdivided into subzones of middle and southern taiga. The steppe zone embraces the Lakes Toray catchment, southern parts of the Onon River and the Argun River, as well as the space between the Kuenga and the Nercha rivers. The forest/steppe zone with diffused boundaries occupies the intermediate position between taiga and steppe..

The climate of the territory under consideration is sharply continental one, with cold and long winter, and warm and short summer. The precipitates distribution is non-uniform. The most arid area is the dry-steppe zone to the south from the Borzya River and the Onon River (250–300 mm/year). More than a half of the area is half-dry with annual amount of precipitates from 300 to 500 mm. The main ridges relate to the half-humid zone with the amount of precipitates from 500 to 700 mm per year (up to 1000 mm in the southern part of the Yablonov Ridge) [7]. Amount of precipitates in high-water years 2-3 times exceeds the amount over the low-water years in the entire territory.

Replenishment of rivers is carried out mostly at the expense of surface water with predominant rain feeding. Other sources of recharge for the most of rivers are insignificant: contribution of snow is from 5 to 14 %, contribution of groundwater is from 5 to 16–18 % (on the average 11 %) [6]. In respect of water regime, the rivers relate to far Eastern type. During the warm period on the average there are 4–6 floods, and on the small rivers up to 6–9 [8].

Diversity of landscapes and climatic conditions enables to identify 5 hydrological areas whose average characteristics differ considerably: average height from 700 to 1300 m over sea level; density of the river network from 0.13 to 0.55 km/km²; modulus of low from 0.11 to 5.21 (l/s)/km² [8]. Analog characteristics of 21 subareas that compose hydrological areas differ even more considerably.

The territory under investigation is in general poorly studied: in the past 144 hydrological stations operated there, nowadays their number has decreased to 75, 16 out of them are of the level type (Fig. 1). The catchment area up to 200 km² has three hydrological stations (table 1) located near the city of Chita, areas up to 500 km² have 4 ranges of observation. This creates considerable difficulties in the choice of analog rivers for solution of many hydrological tasks as the overwhelming majority of water-passing facilities and mining enterprises are located at small watercourses. There are practically no hydrological stations in mountain areas (higher than 900 m over sea level there is 1 range of observations, and higher than 800 m BC there are 4 stations). The operative monitoring network is distributed very non-uniformly: in three hydrological sub-areas out of 21 there are no hydrological stations, in one sub-area there 4 runoff and 2 level stations of observation.

Fig. 1. Diagram of current observation network of ZabUGMS in the territory of the Amur River basin (Hydrological station types: red – runoff, black – level).

Table 1. Distribution of hydrological posts according to the main geographic features

Indicator	Range	Number of stations		
		acting	closed	total
Catchment area, km ²	< 200	3	11	14
	200 – 2000	26	28	54
	> 2000	46	30	76
Height over sea level, m	< 600	33	44	77
	600 – 900	41	22	63
	> 900	1	3	4

This work uses series of hydrological observations on 58 operable and 44 closed hydrometric stations. The data from the closed observation stations enabled to achieve more uniform distribution of the network under analysis in respect of the height, catchment and territory area as termination of observations was often caused by liquidation of inhabited locations in the difficult to access areas due to the population flow-out.

For the longest series of observations (the Shilka River – Sretensk – the Ingoda River – Atamanovka, the Onon River – Olovyanaya, the Ululga River – Ululga, the Chita River – Chita) we have carried out statistical analysis their uniformity and synchronism [9]. Values of Fisher and Student criterion indicate non-uniformity of the series for the entire period of observations, and coefficients of pair correlation indicate their sufficient synchronism.

Separation of representative period for calculation of the annual runoff norm was carried out by the method of differential integral curve for the hydrological station at the Shilka River (Sretensk) [10], for which the most prolonged series of observations is available. It has been stated that for calculating of the norm of runoff it is possible to use periods from 1942, 1962 or 1989 (Fig. 2). In connection with the fact that in 1942 there were practically no hydrological stations, and the period from 1989 embraces only one cycle of water content it has been decided to consider the 1962–2016 period a representative one.

Distribution of the hydrological stations under analysis according to the observation duration periods is presented in Table 2. The share of stations with observations covering the entire representation period is 45 % (46 stations), therefore it was necessary to elongate the series for the analog rivers. It is noteworthy that many series of observations were begun and completed in different years but the most number of stations were closed in the period from 1988 to 1997 (22.5 % of the total number of the objects to be analyzed).

Table 2. Distribution of the hydrological stations under analysis according to observation duration

Duration of the observation period, years	Less than 10	10–19	20–29	30–39	40–49	50–59	60–69	70 and more	Total
Number of hydrological stations	6	14	13	8	9	11	15	26	102

We have obtained average many-year flows of water for each of 102 hydrological stations. They were reduced to the representative 1962–2016 period and can be considered the norm of annual runoff Q_0 . These results are close the natural conditions in connection with insignificant impact of anthropogenic factors due to the absence of water reservoirs upstream of all observation ranges and small volume of irreversible withdrawal of surface waters.

The order of each river was to be determined in the observation ranges according to A. Scheidegger formula [11]:

$$N_{III} = 1 + \log_2 P, \quad (1)$$

where P is a number of the first order rivers in a river basin upstream of the range of determination N_{III} .

The advantage of A. Scheidegger approach is in gradual increase of the river order with the inflow of other watercourses to it instead of maintaining of the order permanent value [12 and others] or changing its value discretely [13 and others].

The water courses of the length up to 10 km are taken as the first order tributaries in the formula (1), the data on them is given in the reference book [14]. To do this:

- the total number of tributaries longer 10 km has been calculated for all rivers located upstream of the range to be analyzed according to the graph of the river basin;
- the number of tributaries longer than 10 km that inflow to the river under investigation upstream of the range to be analyzed has been determined by topographic maps (in some cases it was done by proportional ratios);
- an unknown quantity P was to be determined by adding two the above indicated values.

As a result of researches the orders of the rivers in the reaches of each of 102 hydrological stations under analysis have been determined. This has enabled to form a relevant database a fragment of which is presented in Table 3.

Table 3. Hydrological data at observation ranges of the Ingoda River

River	Station	Period of observation, year	Catchment area F , km ²	Station zero mark, m over sea level	Order N_{III}	Runoff norm Q_0 , m ³ /s	Runoff modulus Q_0 , l/(s/km ²)
Ingoda	Gryazi*	1957–1970	535	1245.55	8.00	7.67	14.34
	Deshulan	1945–2016	6130	808.19	11.04	46.79	7.63
	Ulety	1936–2016	12500	735.52	12.01	69.89	5.59
	Atamanovka	1899–2016	22000	630.10	12.43	84.38	3.84
	Tarskaya*	1976–2016	32700	570.95	12.88	100.68	3.08
	Krasnoyarova	1941–2016	37000	510.06	12.98	114.25	3.09

Note: * – runoff norm and modulus have been determined with the use of analogs.

Two observation stations have been excluded from the consideration as a result of statistical analysis: the Uldza-Gol River is located in a vast internal-drainage area, the main part of which is on the territory of Mongolia; existence of the single hydrological station (Solovyevsk) does not enable to find regularities; the Khila river (Aga) is regulated by a lot of steppe lakes runoff from them can be absent for several years.

Thus, definitive results of the research are based on the observation data from one hundred of hydrological stations.

RESULTS AND DISCUSSION

Processing of hydrological data concerning the Amur River basin territory of Transbaikal Kray has enabled to get the following dependency for the runoff norm (Fig. 3):

$$Q_0 = 0,0179 \cdot e^{0,691 \cdot N_{\text{ш}}} (R = 0,97). \quad (2)$$

As follows from Fig. 3, there is a significant discrepancy between (2) and dependence obtained by N.I. Alekseyevskiy *et al* [15] for the entire Amur River basin with the analog correlation coefficient:

$$Q_0 = 0,024 \cdot e^{0,69 \cdot N_{\text{ш}}} (R = 0,97). \quad (3)$$

In our opinion this was associated with the fact in derivation of (3) the data for the Transbaikal Kray stations with the average many-year annual flow about 20 m³/s, were used while for the rest part of the Amur River basin this value was about 240 m³/s. As it is known, regressive analysis is based on minimization of the sum of squares of deviations approximating the analyzed data functions, therefore the materials concerning Transbaikal region practically do not affect the outcomes of determination of the single basin dependence [16].

One can observe the analog situation in case of regressive analysis for the whole data file concerning Transbaikal Kray: dependence (2) mainly reflects regularities for hydrological stations with the runoff norm big values. Consideration of only river reaches with the catchment territories area up to 2000 km² has enabled to obtain a new dependence:

$$Q_0 = 0,039 \cdot e^{0,582 \cdot N_{\text{ш}}} (R = 0,85). \quad (4)$$

A lower value of the correlation coefficient in comparison with (2) indicates the azonal factors impact on the small and medium rivers runoff. Thus, it is expedient to consider big rivers separately in order to get a single regional dependence while to carry out zoning for small watercourses. For the analyzed territory five areas have been identified (Fig. 4, Table 4) with different values of the coefficients in exponential dependency of the following kind:

$$Q_0 = a \cdot e^{b \cdot N_{\text{ш}}}. \quad (5)$$

Fig. 4. Schemes of zoning on the dependence $Q_0 = f(N_{\text{ш}})$.

Table 4. Hydrological areas depending on the flow rate of small and medium rivers

NN in Fig. 4	Name	Parameters in dependence (5)		Correlation coefficient
		a	b	
I	Dauria mountain/taiga area	0,132	0,5009	0,97
II	Middle Ingoda forest/steppe area	0,0088	0,7676	0,97
III	Lower Ingoda/ Undine mountain/ taiga and forest/steppe area	0,0256	0,6295	0,97
IV	Shilka/Lower Argun/Amazar mountain/taiga area	0,0485	0,592	0,95
V	Onon/Argun steppe/ and forest/ steppe area	0,023	0,6044	0,95

Note: territories without number are areas of internal runoff.

The map illustrates the Krasnodar Krai region divided into three numbered zones for zoning schemes. Zone 1 (green) is located in the west and south, including settlements like Krasnodar, Yalta, and Dzhidzhar. Zone 2 (pink) is in the central and northern parts, including settlements like Krasnodar, Yalta, and Dzhidzhar. Zone 3 (blue) is in the northeast, including settlements like Krasnodar, Yalta, and Dzhidzhar. The map also shows major rivers and other geographical features.

For zone 1:

For zone 2:

For zone 3:

For unstudied rivers in the conditions of unavailability of reliable analogs, the following mechanism of calculation of the runoff norm has been proposed:

- the river order for the analyzed range is to be calculated by (1) with the use of the data from the “Degree of hydrological knowledge” [14] and map data or according to formulas (6–8) depending on the zone as in Fig. 5;
- the zone of location of the analyzed range is to be determined according to the scheme in Fig. 4 and the runoff norm is to be calculated according to formula (5) with the use of coefficients from Table 4.

CONCLUSION

The presented article proposes to consider the issue of the runoff norm determination depending on the order of the river according to A. Scheidegger not in terms of the one and single basin or regional dependence but on the basis of zoning that takes into consideration azonal factors of the small and medium-sized rivers runoff formation.

For the Amur River territory within the boundaries of Transbaikalia five areas have been singled out and dependencies for calculation of the unstudied rivers runoff norms have been obtained. The proposed dependencies have high correlation with the data of many-year hydrological observations at small and medium rivers: the correlation coefficient values are within the range from 0.95 to 0.97, when the single dependency for the same hydrological stations has correlation coefficient 0.85.

An auxiliary pattern for the territory under analysis zoning has been developed to decrease the labor-intensiveness of the river order determination, and the dependencies of the river orders on the catchment area have been obtained for each of the three zones.

Preliminary results of the research indicate the possibility of application of the proposed approach to determination of the minimal runoff parameters and tentative calculation of the maximal water flows.

REFERENCES

1. Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik [Reference book for determination of hydrological characteristics]. L.: Gidrometeoizdat, 1984. 448 p.
2. Beck H.E., van Dijk A.I.J.M., de Roo A., Dutra E., Fink G., Orth R., Schellekens J. Global evaluation of runoff from 10 state-of-the-art hydrological models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017. V. 21. P. 2881–2903. DOI: 10.5194/hess-21-2881-2017.
3. Ayzel' G.V., Belozyorov E.V., Kurochkina L.S. Opredelenie raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik pri otsutstviy dannykh gidrometricheskikh nablyudeniy: potentsial ispol'zovaniya regional'nogo setochnogo reanaliza rechnogo stoka [Determination of the rated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations: potential of the use of the regional network reanalysis of the runoff] // *Vodnoe khozyaystvo Rossiya*. 2020. № 2. P. 83–101. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-6.
4. Alekseevskiy N.I., Kositskiy A.G., Khristoforov A.V. Fraktalnye svoystva rechnykh system i ikh ispol'zovanie v gidrologicheskikh raschetakh [River systems fractal characteristics and their application in hydrological calculations] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013. № 371. P. 167–170.
5. Degtyarev S.D. Porjadok rechnoy seti kak sistemnyy parameter pri ocenke estestvennykh vodnykh resursov [Order of a river network as a system parameter in assessment of natural water resources] // *Modeli i tehnologii prirodoobustroystva (regional'nyy aspekt)*. 2015. № 1. P. 23–25.
6. Zaslonovskiy V.N., Shalikovskiy A.V., Konnov V.I., Kosarev S.G., Sokolov A.V., Sharapov N.M., Cherepanova T.V., Manilyuk T.A., Shilnikova T.L., Kapralov V.I. Vodnye resursy Chitinskoy oblasti: sostoyanie, problemy, puti resheniya [Water resources of Chita oblast; status, problems, and ways of their solution]. Chita: ChitGTU, 1998. 111 p.
7. Geografiya Zabaykalskogo kraya [Geography of Transbaikalia Kray]: ucheb. posobie / Pod red. V.S. Kulakova. Chita: Jekspress-izdatel'stvo, 2009. 308 p.
8. Resursy poverhnostnykh vod SSSR [Resources of the surface waters of the USSR]. Tom 18. Dalniy Vostok. Vypusk 1. Verkhniy i Sredniy Amur (ot istokov do s. Pompeyevka) L.: Gidrometeoizdat, 1966. 782 p.

9. Metodicheskie rekomendatsiyi po otsenke odnorodnosti gidrologicheskikh kharakteristik i opredelenie ikh raschetnykh znacheniy po neodnorodnym dannym [Methodical recommendations on assessment of the hydrological characteristics homogeneity and determination of their calculated values in compliance with heterogeneous data]. S-Pb.: Nestor-Istoriya, 2010. 162 p.
10. *Shalikovskiy D.A.* Podgotovka gidrologicheskoy informatsiyi dlya korrektnogo opredeleniya normy rechnogo stoka [Preparing of hydrological information for correct determination of the river runoff norm] // *Molodyozhnaya nauchnaya vesna: materialy XLIV Nauchno-prakticheskoy konferentsiyi molodykh issledovateley ZabGU. Chita: ZabGU, 2017. Ch.4. P. 27–30.*
11. *Scheidegger A.E.* Stochastic branching process and the law of stream orders // *Water Resour. Res.* 1966. Vol. 2. № 2. P. 199-203.
12. *Horton R.E.* Eroziionnoye razvitie rek i vodosbornykh basseynov. Gidrofizicheskiy podkhod k kolichestvennoy morfologiyi [Erosion development of rivers and catchment basins. Hydrological approach to quantitative morphology]. M.– L.: Izdatel'stvo inostranoy literatury, 1948. 158 p.
13. *Rzhanitsyn N.A.* Morfologicheskie i gidrologicheskie zakonomernosti stroeniya rechnoy seti [Morphological and hydrological laws of a river network structure]. L.: Gidrometeoizdat, 1960. 238 p.
14. Gidrologicheskaya izuchennost' [Degree of hydrological knowledge]. Tom 18. Dal'niy Vostok. Vypusk 1. Amur. L.: Gidrometeoizdat, 1966. 488 p.
15. *Alekseyevskiy N.I., Kositskiy A.G., Nosan' V.V., Khristoforov A.V.* Podobie recknikh sistem [Rivers and their systems similarity] // *Vodnyeresursy.* 2013. V. 40. № 6. P. 531–543. DOI: 10.7868/S0321059613060035
16. *Shalikovskiy D.A.* O problemakh v ustanovleniyi zakonomernostey mezhdu stokovymi kharakteristikami i poryadkom reki na primere Zabaykalskogo kraya [On the problems in determination of regularities between runoff characteristics and the order of a river with Transbaikal Krai as a study case] // *Kulaginskije chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh processov: sbornik statey XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsiyi, 2019. Ch. 3. P. 39-42.*

For citation: *Shalikovskiy D.A., Zaslonskiy V.N., Shalikovskiy A.V. An Alternative Approach to Determining the Rate of Runoff of Unstudied Rivers (The Amur River basin in the Transbaikal Krai as a Study Case) // Water Sector of Russia. 2020. No. 6. P. 6–27.*

About the authors:

Dmitry A. Shalikovskiy, Junior Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, East Branch; Graduate student of Department of Water Management, Environmental and Industrial Safety, Transbaikal State University, ul. Aleksandro-Zavodskaya 30, Chita, 672039, Russia; e-mail: sda1810199561@gmail.com

Valery N. Zaslonskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection East Branch; Professor of Department of Water Management, Environmental and Industrial Safety, Transbaikal State University, ul. Aleksandro-Zavodskaya, 30, Chita, 672039, Russia, e-mail: vnzaslonskiy@mail.ru

Andrei V. Shalikovskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, East Branch; Professor of Department of Water Management, Environmental and Industrial Safety, Transbaikal State University, ul. Aleksandro-Zavodskaya 30, Chita, 672039, Russia; e-mail: vostokniivh@mail.ru