

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА СРЕДНЕМОГОЛЕТНЕГО ГОДОВОГО СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ

**А. А. Волчек<sup>1</sup>, С. В. Сидак<sup>2</sup>, С. И. Парфомук<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Д. геогр. н., профессор, декан факультета инженерных систем и экологии

учреждения образования «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

<sup>2</sup>Магистр физ.-мат. н., ассистент кафедры информатики и прикладной математики

учреждения образования «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

<sup>3</sup>К. т. н., доцент, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики

учреждения образования «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: parfom@mail.ru

### Реферат

В результате исследования построены современные карты распределения среднесмолетних годовых модулей и коэффициентов вариации стока рек Беларуси за период 1953–2017 гг. Анализ построенных карт позволяет сделать вывод о том, что произошло некоторое несущественное перераспределение водных ресурсов на территории Беларуси. Полученные закономерности пространственного распределения стока хорошо коррелируют с общими закономерностями формирования стока в Восточной Европе. Уточненные данные по распределению стока могут быть трансформированы в современные глобальные гидрологические карты.

**Ключевые слова:** карта речного стока, модуль стока, коэффициент вариации, интерполяция, ГИС, программа ArcGis.

### SPATIOTEMPORAL STRUCTURE OF THE AVERAGE ANNUAL RIVER RUNOFF IN BELARUS

**A. A. Volchak, S. V. Sidak, S. I. Parfomuk**

### Abstract

Modern maps of the average long-term annual distribution of the modules and coefficients of variation of the river runoff in Belarus for the period 1953–2017 are constructed. The analysis of the developed maps allows concluding that there was some insignificant redistribution of water resources in the territory of Belarus. The obtained patterns of spatial runoff distribution correlate well with the general patterns of runoff formation in Eastern Europe. The updated runoff distribution data can be transformed into modern global hydrological maps.

**Keywords:** map of the river runoff, runoff modulus, coefficient of variation, interpolation, GIS, ArcGis software.

### Введение

Водные ресурсы являются одним из важнейших природных ресурсов любой страны, которые в той или иной степени определяют экономическую стратегию её развития. Поэтому объективная количественная оценка этого ресурса важна для всех отраслей страны. Проблема в оценке водных ресурсов заключается в том, что этот ресурс изменяется как по территории, так и во времени. Кроме того, водные ресурсы подвержены влиянию природных факторов и антропогенным воздействиям, которые стали особо заметны в последнее время.

В связи с тем, что речной сток, который представляет водные ресурсы суши, является величиной интегральной, а измерения осуществляются дискретно, для представления его пространственной структуры используют модуль стока, который численно равен расходу с единицы площади, что позволяет получить сопоставимые водные характеристики для различных по площади водосборов рек. Это позволяет представлять сток в виде карт, построенных по принципу климатического стока и получать гидрологические характеристики в тех точках, где отсутствуют наблюдения.

В процессе оценки водных ресурсов территории наиболее значима роль карт распределения модуля среднесмолетнего годового стока. Подобные карты для территории Беларуси построены в 1966 г. [1], 2000 г. [2], 2002 г. [3], 2005 г. [4]. Однако существующие в настоящее время карты в той или иной степени утратили свою актуальность по ряду причин. Во-первых, они не отвечают требованиям нормативных документов, в частности ТКП, согласно которому определение расчетных гидрологических характеристик должно основываться на данных многолетних гидрометеорологических наблюдений с единым расчетным периодом, при этом обязательным является наличие регулярных наблюдений последних лет [5]. Это позволит учесть усилившиеся в последние десятилетия процессы глобального потепления климата и антропогенных воздействий, что несомненно наложило свой отпечаток на формирование стока рек Беларуси [6, 7, 8]. Во-вторых, развитие методов пространственной интерполяции и компьютерных технологий позволяют объективно построить карты среднесмолетних модулей стока рек Беларуси.

В этой связи весьма актуальным становится вопрос построения современной карты модуля и коэффициента вариации стока рек Беларуси. Реализация этой цели заключается в последовательном выполнении следующих задач:

- выбор репрезентативного расчетного периода гидрологических наблюдений для построения карт;
- приведение данных о речном стоке к единому многолетнему периоду;
- определение количества точек, необходимых для объективного пространственного представления о стоке на территории Беларуси;
- выбор программного средства для построения карт и анализ методов пространственной интерполяции характеристик речного стока;
- определение наиболее оптимального метода пространственной интерполяции;
- методологический анализ и представление результатов картографирования, полученных в результате оценки методов интерполяции;
- оценка изменений пространственной трансформации стока рек Беларуси.

### Исходные данные

Для решения указанных выше задач в исследовании использованы данные наблюдений государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по действующим гидрологическим постам за период инструментальных наблюдений, опубликованные в материалах государственных кадастров. Также при построении карт использованы данные сопредельных государств, что позволило объективно оценить значения стока для трансграничных рек.

### Выбор репрезентативного периода

Важным фактором при расчете гидрологических характеристик по рядам наблюдений является выбор репрезентативного периода из генеральной совокупности данных.

Использование рядов наблюдений за среднегодовыми расходами речного стока для гидрологических исследований требует выбора расчетного периода, для которого должны выполняться следующие условия:

- средние величины рядов наблюдений соответствуют норме;
- прослеживается законченный период колебаний водности;
- длина ряда достаточна для оценки требуемой эмпирической обеспеченности водности [9].

Согласно ТКП ряд наблюдений за речным стоком считается репрезентативным для определения среднего многолетнего значения, если средняя квадратическая ошибка расчетного значения гидрологической характеристики не превышает 10 % для годового стока [5].

Для реализации задачи определения репрезентативного периода выбраны 6 наиболее характерных гидропостов Беларуси: р. Припять – г. Мозырь, р. Неман – г. Гродно, р. Западная Двина – г. Витебск, р. Березина – г. Бобруйск, р. Днепр – г. Орша и р. Днепр – г. Речица. Продолжительность наблюдений по каждому из них составила 141 год (1877–2017 гг.).

Для определения основных статистических характеристик временных рядов среднегодового стока использованы следующие формулы:

- норма стока,  $\bar{Q}$

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (1)$$

- коэффициент вариации,  $C_v$

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1}}, \quad (2)$$

- ошибка определения нормы стока,  $\sigma_{\bar{Q}}$

$$\sigma_{\bar{Q}} = \pm \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100, \% , \quad (3)$$

- ошибка определения коэффициента вариации,  $\sigma_{C_v}$

$$\sigma_{C_v} = \pm \sqrt{\frac{3}{2n(3 + C_v^2)}}, \quad (4)$$

где  $n$  – число членов ряда наблюдений,  $K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$  – модульный коэффициент.

Таблица 2 – Ошибки определения нормы годового стока  $n$ -летних периодов

$n$ , лет	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
<i>р. Припять – г. Мозырь</i>												
средняя	9,09	7,61	6,71	5,98	5,59	5,22	4,93	4,69	4,47	4,29	4,12	3,98
макс.	14,05	10,29	8,57	7,76	6,89	6,23	5,66	5,23	4,92	4,72	4,45	4,25
мин.	4,65	5,06	4,60	4,29	4,32	4,04	4,00	3,96	3,88	3,72	3,54	3,49
<i>р. Неман – г. Гродно</i>												
средняя	4,97	4,18	3,70	3,32	3,10	2,91	2,77	2,65	2,54	2,44	2,35	2,25
макс.	8,74	6,38	5,04	4,50	3,74	3,48	3,22	2,99	2,84	2,68	2,53	2,42
мин.	2,61	2,65	2,82	2,53	2,42	2,37	2,23	2,12	2,02	1,98	2,12	2,02
<i>р. Западная Двина – г. Витебск</i>												
средняя	7,75	6,55	5,85	5,22	4,92	4,57	4,29	4,07	3,88	3,70	3,54	3,40
макс.	11,74	8,72	7,45	6,88	5,59	5,15	4,70	4,39	4,17	3,99	3,81	3,59
мин.	3,93	4,56	4,12	3,39	3,83	3,47	3,44	3,55	3,53	3,49	3,33	3,14
<i>р. Березина – г. Бобруйск</i>												
средняя	6,05	4,88	4,21	3,67	3,43	3,18	2,99	2,84	2,70	2,59	2,48	2,38
макс.	12,89	8,59	7,03	5,90	4,79	4,23	3,69	3,37	3,11	3,12	2,95	2,86
мин.	2,94	2,87	2,67	2,33	2,37	2,12	2,41	2,27	2,36	2,21	2,13	2,04
<i>р. Днепр – г. Орша</i>												
средняя	7,46	6,26	5,54	4,94	4,62	4,29	4,02	3,81	3,61	3,45	3,29	3,15
макс.	11,92	8,95	7,22	6,48	5,28	4,76	4,40	4,11	3,83	3,68	3,59	3,43
мин.	4,22	3,91	3,80	3,15	3,81	3,45	3,47	3,34	3,29	3,12	3,01	2,98
<i>р. Днепр – г. Речица</i>												
средняя	6,21	5,16	4,56	4,07	3,80	3,54	3,35	3,18	3,04	2,91	2,79	2,68
макс.	10,16	7,57	6,17	5,65	4,53	4,00	3,76	3,65	3,46	3,24	3,12	2,95
мин.	2,60	2,56	2,67	2,35	2,55	2,40	2,58	2,43	2,39	2,50	2,53	2,44

В данном исследовании для оценки репрезентативного периода использован метод, основанный на применении «динамических» оценок гидрологических параметров [10].

Для определения репрезентативного периода из всего ряда наблюдений сформированы более короткие периоды длины  $n = 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65$  лет. По формулам (1)–(4) рассчитаны основные характеристики каждого полученного временного ряда. Периоды выделены со сдвигом на 1 год, т. е. для 20-летних это: 1877–1896, 1878–1897...1998–2017.

Затем вычислены отношения рассчитанных параметров  $n$ -летних периодов к параметрам всего ряда. В качестве примера в таблице 1 приведены значения величин статистических параметров и их отношений для реки Днепр – г. Орша с зафиксированным начальным годом 1953.

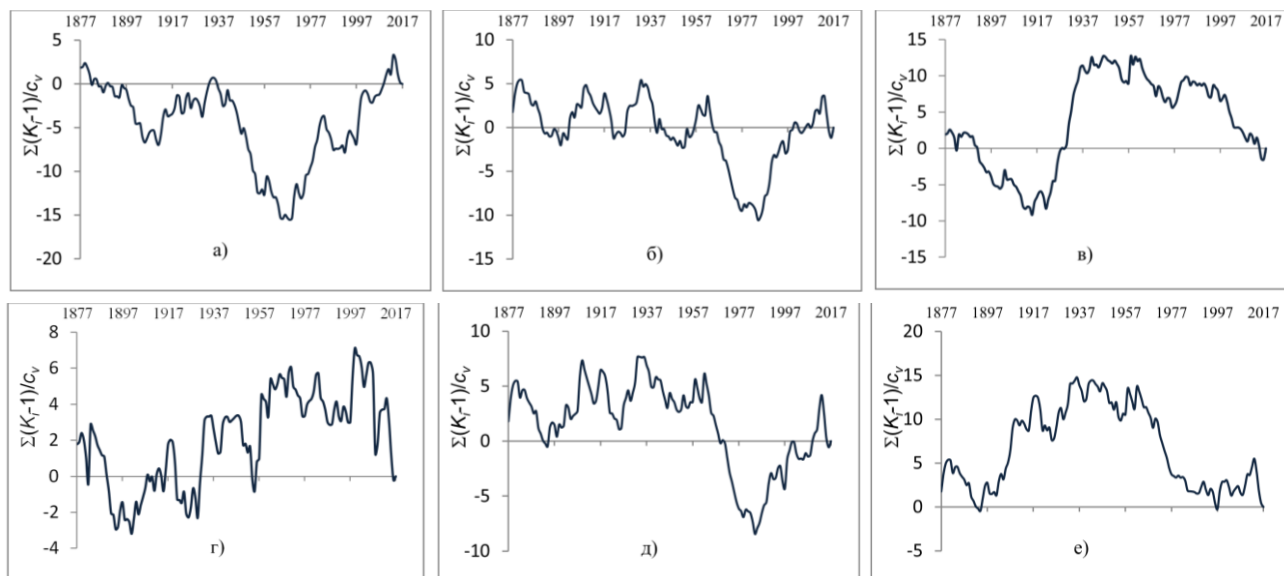
Таблица 1 – Параметры некоторых  $n$ -летних периодов годового стока р. Днепр – г. Орша и их отношение к статистическим параметрам всего ряда (1877–2017 гг.) с зафиксированным 1953 г.

Период	$n$	$\bar{Q}_n, \text{м}^3/\text{с}$	$\bar{Q}_n/\bar{Q}$	$\sigma_{\bar{Q}}, \%$	$C_{vn}$	$C_{vn}/C_v$	$\sigma_{C_{vn}}, \%$
1953–1962	10	137	1,08	9,5	0,30	1,16	22,0
1953–1967	15	124	0,98	8,2	0,32	1,23	18,0
1953–1972	20	120	0,94	6,7	0,30	1,16	15,6
1953–1977	25	115	0,91	5,8	0,29	1,13	13,9
1953–1982	30	116	0,92	4,9	0,27	1,03	12,8
1953–1987	35	118	0,93	4,4	0,26	1,01	11,8
1953–1992	40	122	0,96	4,1	0,26	1,00	11,1
1953–1997	45	122	0,96	3,8	0,25	0,98	10,4
1953–2002	50	124	0,98	3,7	0,26	1,02	9,9
1953–2007	55	126	0,99	3,4	0,25	0,97	9,4
1953–2012	60	127	1,00	3,3	0,25	0,98	9,0
1953–2017	65	125	0,99	3,3	0,27	1,03	8,7

Рассчитанные средние, минимальные и максимальные ошибки определения нормы стока и коэффициента вариации по исследуемым 6 рекам-створам приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 3 – Ошибки определения коэффициента вариации годового стока  $n$ -летних периодов

$n$ , лет	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
<i>р. Припять – г. Мозырь</i>												
средняя	22,05	17,99	15,58	13,93	12,71	11,76	11,00	10,37	9,84	9,38	8,98	8,62
макс.	22,28	18,14	15,70	14,03	12,79	11,84	11,06	10,42	9,88	9,42	9,02	8,66
мин.	21,66	17,79	15,44	13,80	12,61	11,69	10,95	10,33	9,80	9,35	8,95	8,60
<i>р. Неман – г. Гродно</i>												
средняя	22,26	18,18	15,74	14,08	12,85	11,89	11,12	10,49	9,95	9,48	9,08	8,72
макс.	22,34	18,23	15,77	14,10	12,87	11,91	11,14	10,51	9,97	9,50	9,09	8,73
мин.	22,08	18,07	15,68	14,02	12,82	11,87	11,10	10,47	9,93	9,47	9,07	8,72
<i>р. Западная Двина – г. Витебск</i>												
средняя	22,13	18,06	15,63	13,98	12,76	11,81	11,05	10,41	9,88	9,42	9,02	8,66
макс.	22,30	18,16	15,72	14,07	12,82	11,87	11,09	10,44	9,90	9,43	9,03	8,68
мин.	21,86	17,92	15,53	13,87	12,71	11,77	11,02	10,39	9,86	9,40	9,00	8,65
<i>р. Березина – г. Бобруйск</i>												
средняя	22,21	18,14	15,71	14,06	12,83	11,88	11,11	10,48	9,94	9,48	9,07	8,72
макс.	22,33	18,22	15,77	14,11	12,87	11,92	11,14	10,50	9,95	9,49	9,09	8,73
мин.	21,77	17,93	15,56	13,94	12,76	11,83	11,08	10,45	9,92	9,45	9,05	8,69
<i>р. Днепр – г. Орша</i>												
средняя	22,14	18,08	15,65	14,00	12,77	11,83	11,06	10,43	9,89	9,43	9,03	8,68
макс.	22,29	18,19	15,74	14,08	12,82	11,87	11,09	10,45	9,91	9,45	9,05	8,69
мин.	21,85	17,90	15,54	13,90	12,73	11,80	11,04	10,41	9,88	9,42	9,01	8,66
<i>р. Днепр – г. Речица</i>												
средняя	22,21	18,13	15,70	14,04	12,82	11,86	11,10	10,46	9,92	9,46	9,06	8,70
макс.	22,34	18,23	15,77	14,11	12,87	11,91	11,13	10,49	9,95	9,48	9,07	8,71
мин.	21,99	18,00	15,61	13,96	12,78	11,84	11,08	10,44	9,90	9,44	9,04	8,69



а) р. Припять – г. Мозырь, б) р. Западная Двина – г. Витебск, в) р. Неман – г. Гродно, г) р. Березина – г. Бобруйск, д) р. Днепр – г. Орша, е) р. Днепр – г. Речица

Рисунок 1 – Разностно-интегральные кривые годового стока:

Из рисунка 1 видно, что смена многоводных и маловодных фаз на разных реках происходит в разные периоды. Например, на р. Припять – г. Мозырь полный цикл составляет 70 лет, на р. Западная Двина – г. Витебск – 30 лет, на р. Неман – г. Гродно – 85 лет, на р. Березина – г. Бобруйск – 65 лет, на р. Днепр – г. Орша – 50 лет, на р. Днепр – г. Речица – 100 лет.

При вычислении нормы стока репрезентативным считается ряд, содержащий 2–4 цикла [11]. Учитывая этот факт и результаты вычислений в таблицах 2 и 3 ошибок, для рассматриваемых гидропостов репрезентативным будет считаться ряд с продолжительностью наблюдений 60 и более лет. Следовательно, в качестве расчетного периода для построения карты распределения модуля стока Беларуси выберем 65-летний период 1953–2017 гг.

**Приведение данных о речном стоке к единому многолетнему периоду**

Для повышения точности построения карт модулей и коэффициентов вариации годового стока необходимо приведение данных наблюдений к многолетнему периоду. Приведение рядов с малой

продолжительностью периодов наблюдений по выбранным для построения карты гидропостам произведено с помощью компьютерного программного комплекса «Гидролог-2» [12].

При работе с пространственными данными в первую очередь необходимо понять, насколько эффективна сеть мониторинга [13]. В работе [14] исследовано оптимальное количество гидрологических постов наблюдений за значениями годового стока рек Беларуси. В исследовании показано, что количество станций наблюдений за стоком является достаточным для решения тех или иных водохозяйственных и гидрологических задач. В то же время количество гидрологических постов наблюдений за годовым стоком минимально допустимо. Исходя из этого, построение карт в данной работе осуществлялось с использованием данных по 120 гидрологическим постам, равномерно расположенным на территории Беларуси.

**Программные средства реализации проекта**

Применение ГИС-технологий в гидрологических расчетах открывает новые возможности для проведения инженерных гидрологических

расчетов при отсутствии данных наблюдений в расчетном створе, позволяет создавать надежные и достаточно точные стоквые карты.

К сожалению, в Беларуси вопросы составления карт не регламентированы инструкциями и методическими указаниями по применению ГИС-технологий в гидрологических расчетах и требуют серьезного гидрологического и географического анализа для каждого картографируемого показателя.

Построение карт модуля и коэффициента вариации среднемноголетнего годового речного стока рек Беларуси проведено с использованием программного средства ArcGIS. Программный комплекс ArcGIS позволяет визуализировать большие объемы статистической информации, имеющей географическую привязку, создавать и редактировать карты разных масштабов [15]. Семейство геоинформационных программных продуктов ArcGIS предлагает широкий инструментарий по пространственному моделированию, которое осуществляется с помощью специального модуля геостатистического анализа (Geostatistical Analyst).

#### Методы представления пространственных данных в ArcGIS

Пространственная интерполяция – подход к решению проблемы определения данных в смежной области и прогнозирование значений анализируемого показателя в точках, значения в которых неизвестны (информация отсутствует или не может быть получена) по известным значениям той или иной величины в определенных точках [16].

Различают две основные группы методов интерполяции: детерминированные и геостатистические. Методы детерминированной интерполяции создают поверхности, содержащие точки с измеренными значениями, в зависимости от степени схождения или степени сглаживания. Есть два типа детерминированной интерполяции: глобальная и локальная. Глобальная интерполяция использует весь набор данных для прогноза. Напротив, локальная интерполяция рассчитывает прогнозы на основе измеренных точек в пределах небольшого пространственного района исследуемой области. Детерминированная интерполяция включает глобальную полиномиальную интерполяцию (Global Polynomial Interpolation, GPI), локальную полиномиальную интерполяцию (Local Polynomial Interpolation, LPI), методы обратного взвешенного расстояния (Inverse Distance Weighting, IDW), радиальной базисной функции (Radial Basis Function, RBF), сглаживания ядра (Kernel Smoothing), ядра диффузии (Diffusion Kernel).

При использовании детерминированной интерполяции результирующая поверхность может пройти через значения данных или нет. Метод интерполяции, который предсказывает значение, идентичное измеренному значению в выбранном месте, известен как точный интерполятор. Неточный интерполятор предсказывает значение, которое отличается от измеренного значения, и его следует использовать, чтобы избежать резких пиков или впадин на выходной поверхности. IDW и RBF являются точными интерполяторами, в то время как глобальный и локальный полиномы – неточными.

Вторая группа методов называется геостатистическими или стохастическими методами. Эти методы становятся все более предпочтительными, потому что они основаны на статистических и математических методах, позволяющих строить поверхности и проводить оценку ошибки интерполяции [17]. Геостатистическая интерполяция включает 6 методов кригинга (простой, ординарный, универсальный, индикаторный, вероятностный, дизъюнктивный) и кокригинг [18].

Преимущества и недостатки каждого метода сильно зависят от характеристик множества данных: метод, который хорошо подходит для одного набора данных, может не подходить для другого набора данных. Поэтому необходим выбор критериев для оценки эффективности выбранного метода для набора точечных данных. Согласно многочисленным исследованиям, отражающим сравнение различных методов интерполяции при картографировании характеристик речного стока, преимущество следует отдавать кригингу и методу радиальных базисных функций [19]–[20].

#### Результаты экспериментов для территории Беларуси

Как было сказано выше, для построения карт необходимо воспользоваться модулем стока, который определяется как:

$$M = \frac{Q}{F}, \quad (5)$$

где  $F$  – площадь водосбора.

Выбор подходящего способа интерполяции на первом этапе осуществлялся экспериментально. Для этого в настоящем исследовании при получении пространственного распределения модуля и коэффициента вариации речного стока использованы разные детерминированные и геостатистические методы: IDW, GPI, RBF и ординарный кригинг (Ordinary Kriging, OK).

Результаты интерполяции методом IDW показали, что изолинии местами имеют ломаный характер, на поверхности имеется большое количество локальных замкнутых областей и некорректно выражен закон географической зональности. Интерполяция методом GPI осуществлялась с использованием полиномов 2–6 степеней. При данном способе интерполяции получены сглаженные изолинии, удовлетворяющие требованиям о соблюдении принципа географической зональности при построении карт стока, однако значения модуля стока вышли за пределы крайних опорных точек, в некоторых случаях даже зашли в отрицательные значения, что недопустимо при построении карт распределения модуля стока.

При интерполяции методом RBF из пяти базисных функций использованы три, а именно: полностью регуляризованный сплайн (CRS), многоквадратная функция (MQ), тонкопленочный сплайн (TPS). При интерполяции методом BRF(TPS) значения модуля стока вышли за пределы крайних опорных точек, а применение метода BRF(CRS) привело к наличию большого количества замкнутых локальных областей на севере Беларуси. Изолинии, полученные методом BRF(MQ) и OK имеют плавную форму, без множества локальных областей, поэтому дальнейшее исследование осуществлялось с применением этих двух методов интерполяции.

Для оценки и сопоставления характеристик двух выбранных методов интерполяции в работе применяется перекрестная проверка посредством вычисления нескольких статистических измерений (среднеквадратичной ошибки (RMSE), средней абсолютной ошибки в процентах (MAPE), систематической ошибки (BIAS) и коэффициента детерминации ( $R^2$ )):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i^o - M_i^m)^2}{N}}, \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|M_i^o - M_i^m|}{M_i^o} \cdot 100\%, \quad (7)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i^o - M_i^m), \quad (8)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (M_i^m - \overline{M^m})(M_i^o - \overline{M^o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i^m - \overline{M^m})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i^o - \overline{M^o})^2}} \right]^2, \quad (9)$$

где  $N$  – объем выборки,  $M_i^o$  – фактические данные,  $M_i^m$  – интерполированные данные,  $\overline{M^o}$  – среднее значение фактических данных,  $\overline{M^m}$  – среднее значение интерполированных данных.

Метод перекрестной проверки, или "метод исключения по одному", предполагает последовательное удаление одной точки из всего набора данных и выполнение процедуры интерполяции с использованием оставшегося набора данных. В случае если оставшиеся точки точно предсказывают фактическое значение исследуемой характеристики в «выброшенной» точке, модель интерполяции эффективна. Разность между фактическим и предсказанным значением для определенной точки считается ошибкой перекрестной проверки.

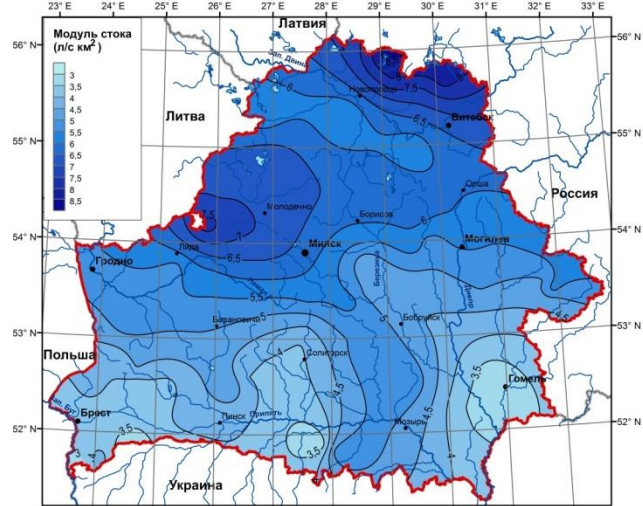
Значения показателей точности, вычисленные по формулам (6)–(9), представлены в таблице 4.

Анализ перекрестной проверки и результаты расчетов показателей оценки точности методов интерполяции RBF (MQ) и OK дали практически аналогичные значения. Карты, построенные с использованием методов OK и RBF с функцией MQ, не имеют существенных различий при визуальной оценке, содержат области с замкнутыми контурами, сформированные в одних и тех же местах карты. Так как отличия в показателях точности для построенных карт не превышают погрешности определения этих характеристик, то методы RBF (MQ) и OK могут быть рекомендованы к использованию при

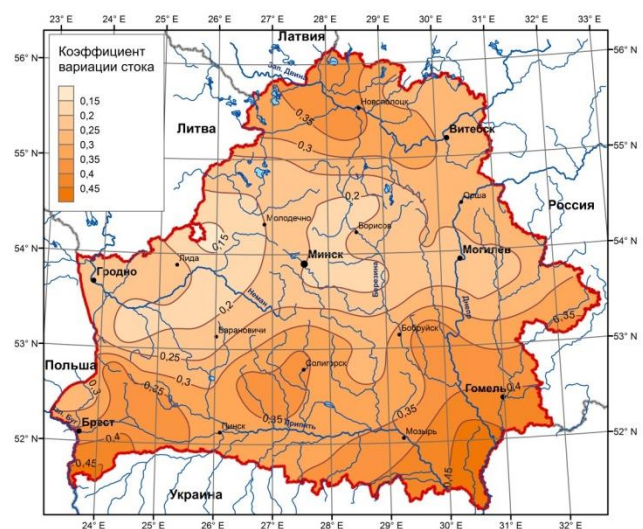
построении карт модулей и коэффициентов вариации среднемноголетнего стока рек Беларуси. Поскольку метод ОК незначительно превосходит по полученным показателям точности метод RBF (MQ) как при построении карт модулей стока, так и коэффициентов вариации, то среди всех протестированных методов интерполяции выберем ОК. На рисунках 2 и 3 представлены карты модулей и коэффициентов вариации среднемноголетнего годового стока рек Беларуси.

**Таблица 4** – Оценка точности методов интерполяции при построении карт модуля и коэффициента вариации среднемноголетнего годового стока рек Беларуси

Метод интерполяции	RBF (MQ)	ОК
<i>модуль стока</i>		
RMSE	0,45	0,46
MAPE, %	7,69	7,33
BIAS	0,04	0,03
R <sup>2</sup>	0,921	0,926
<i>коэффициент вариации стока</i>		
RMSE	0,026	0,021
MAPE, %	9,64	9,31
BIAS	0,00025	0,00019
R <sup>2</sup>	0,911	0,917



**Рисунок 2** – Карта модулей среднемноголетнего годового стока рек Беларуси (за период 1953–2017 гг.)



**Рисунок 3** – Карта коэффициентов вариации среднемноголетнего годового стока рек Беларуси (за период 1953–2017 гг.)

Анализ построенных карт позволяет сделать вывод о том, что закономерности формирования стока рек Беларуси подчиняются широтной зональности, что определяется климатическими факторами. Некоторые отклонения изолиний стока от широтных направлений вызваны гидрологическим строением бассейнов рек. Повышенные значения стока на северо-западе страны определены разгрузкой грунтовых вод в реки региона. Минимальные значения стока на юге Беларуси вызваны уменьшенными атмосферными осадками на этой территории по сравнению с северной частью страны и повышенной температурой в данном регионе.

Изменения годового стока в настоящее время носит разнонаправленный характер. Так, для Западной Двины существенных изменений в пространственном распределении и количественных характеристиках значений модуля стока не произошло. Объективное уменьшение стока в бассейне Вилии вызвано трансформацией естественного стока Вилейским водохранилищем. Этот факт учтен на этапе выбора значений для построения карты, для чего предварительно восстановлен естественный режим стока Вилии [21]. Некоторое уменьшение значений стока в бассейне Немана вызвано строительством ГЭС, что также было учтено на этапе выбора данных построения карты. В связи с этим имеются некоторые различия с картами, построенными ранее, которые не учитывали данное антропогенное воздействие.

Пространственная структура коэффициента вариации стока рек Беларуси в некоторой степени схожа с распределением модуля стока. Как известно, коэффициент вариации стока обратно пропорционален модулю стока, что объясняет повышенные значения коэффициента вариации на юге страны и уменьшение с юга на север.

**Заключение**

В результате выполненных исследований получены современные карты распределения среднемноголетнего годового модуля и коэффициентов вариации стока рек Беларуси.

Полученные закономерности пространственного распределения стока хорошо коррелируют с общими закономерностями формирования стока в Восточной Европе. Уточненные данные по распределению стока могут быть трансформированы в современные глобальные гидрологические карты.

Использование результатов картографирования может определить планирование хозяйственной деятельности, разработку инженерных приложений, обеспечивающих сохранение и рациональное использование водных ресурсов, а также устойчивое управление ими.

*Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № X20M064)*

**Список цитированных источников**

1. Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – Т. 5. Ч. 1: Белоруссия и Верхнее Поднепровье. – 718 с.
2. Пособие к строительным нормам и правилам. П1-98 к СНиП 2.01.14-83 Определение расчетных гидрологических характеристик / Н. В. Шевцов [и др.]; под общ. ред. Н. В. Шевцова. – Минск: РУП «Минсктиппроект», 2000. – 174 с.
3. Белорусская энциклопедия: у 18 т. / редкол.: Г. П. Пашкоў (гл. ред.) [и инш.]. – Минск: БелЭн, 2002. – Т. 15. – 552 с.
4. Логинов, В. Ф. Современные изменения водных ресурсов Республики Беларусь / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, С. И. Парфомук // География и природные ресурсы. – 2008. – № 4. – С. 149–154.
5. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250). – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.
6. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек [и др.]; под общ. ред. А. А. Волчек, В. Н. Корнеева. – Брест: Альтернатива, 2017. – 228 с.
7. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек; НАН Беларуси, Ин-т проблем использ. природ. ресурсов и экол., Полесский аграрно-экол. ин-т. – Минск: Тонпик, 2006. – 160 с.
8. Alexander Volchak, Sergey Parfomuk, and Svetlana Sidak. Intra-annual runoff distribution in the Pripyat River basin // ICBTE 2020, E3S Web of Conferences 212, 01016 (2020); DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021201016>.

9. Волчек, А. А. Минимальный сток рек Беларуси: монография / А. А. Волчек, О. И. Грядунова ; Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина. – Брест : БрГУ, 2010. – 169 с.
10. Волчек А. А. Выбор репрезентативного периода для расчета характеристик годового стока / А. А. Волчек, В. В. Лукша // Водные ресурсы (информационные материалы) № 15. – Минск: ЦНИИКИВР, 2004. С. 84–92.
11. Владимиров, А. М. Гидрологические расчеты / А. М. Владимиров. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 365 с.
12. Волчек, А. А. Автоматизация гидрологических расчетов / А. А. Волчек // Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды: Труды междунар. науч.-практ. конф. по проблемам водохозяйственного, промышленного и гражданского строительства и экономико-социальных преобразований в условиях рыночных отношений / Брест. политехн. институт. – Биберах–Брест–Ноттингем, 1998. – С. 55–59.
13. Куракина, Н. И. Моделирование экологического состояния водного объекта на базе ГИС / Н. И. Куракина, В. Н. Микушина // «Известия ЛЭТИ». СПб. 2007. № 1. С. 45–48.
14. Волчек, А. А. Оптимизация режимной гидрологической сети Беларуси / А. А. Волчек // Мелиорация. – 2020. – № 4. – С. 24–29.
15. Переладова, Л. В. Картографирование статистических параметров речного стока с применением программного комплекса ArcGis / Л. В. Переладова // Информационные технологии в экологии: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Году экологии в России / отв. ред. Т. Б. Казиахмедов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2018. – С. 94–98.
16. DeMers, Michael. N., 2009. Fundamentals of Geographic Information Systems. 4th edition. New York, N.Y.: John Wiley & Sons, 443 pp.
17. Sanders, L. 2007. Models in Spatial Analysis. Newport Beach, CA, U.S.A: ISTE Ltd, 319 pp.
18. Baillargeon.S. Kriging review of the theory and application to the interpolation of precipitation data. Thesis University of Laval (Quebec) 2005. 137 p.
19. Borga M, Vizzaccaro, A. (1997) On the interpolation of hydrologic variables: formal equivalence of multiquadratic surface fitting and kriging // Journal of Hydrology, 195, pp. 160-171.
20. Орлова, Е. В. Определение географических и гидрологических характеристик водных объектов с использованием ГИС-технологий / Е. В. Орлова // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб. : ГГИ, 2008. 218 с.
21. Волчек, А. А. Оценка изменения стока реки Вилии на территории Беларуси / А. А. Волчек // Гидрометеорология и экология. – 2016. – № 4. – С. 32–62.
22. Raschetnye gidrologicheskie harakteristiki. Poryadok opredeleniya. Tekhnicheskij kodeks ustanovivshejsya praktiki TKP 45-3.04-168-2009(02250). – Minsk : RUP «Strojtekhnorm», 2010. – 55 s.
23. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetom izmeneniya klimata / A. A. Volchek [i dr.]; pod obshch. red. A. A. Volchek, V. N. Korneeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 228 s.
24. Loginov, V. F. Vodnyj balans rechnyh vodosborov Belarusi / V. F. Loginov, A. A. Volchek; NAN Belarusi, In-t problem is-pol'z. prirod. resursov i ekol., Poleskij agramo-ekol. in-t. – Minsk : Tonpik, 2006. – 160 s.
25. Alexander Volchak, Sergey Parfomuk, and Svetlana Sidak. Intra-annual runoff distribution in the Pripyat River basin // ICBTE 2020, E3S Web of Conferences 212, 01016 (2020); DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021201016>.
26. Volchek, A. A. Minimal'nyj stok rek Belarusi: monografiya / A. A. Volchek, O. I. Gryadunova ; Brest. gos. un-t imeni A. S. Pushkina. – Brest : BrGU, 2010. – 169 s.
27. Volchek A. A. Vybore reprezentativnogo perioda dlya rascheta harakteristik godovogo stoka / A. A. Volchek, V. V. Luksha // Vodnye resursy (informacionnye materialy) № 15. – Minsk: CNIKIIVR, 2004. S. 84–92.
28. Vladimirov, A. M. Gidrologicheskie raschety / A. M. Vladimirov. – L. : Gidrometeoizdat, 1990. – 365 s.
29. Volchek, A. A. Avtomatizaciya gidrologicheskikh raschetov / A. A. Volchek // Vodohozhajstvennoe stroitel'stvo i ohrana okruzhayushchej sredy: Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. po problemam vodohozhajstvennogo, promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva i ekonomiko-social'nyh preobrazovanij v usloviyah rynochnyh otnoshenij / Brest. politekhn. institut. – Biberah– Brest–Nottingem, 1998. – S. 55–59.
30. Kurakina, N. I. Modelirovanie ekologicheskogo sostoyaniya vodnogo ob'ekta na baze GIS / N. I. Kurakina, V. N. Mikushina // «Izvestiya LETI». SPb. 2007. № 1. S. 45–48.
31. Volchek, A. A. Optimizaciya rezhimnoj gidrologicheskoy seti Belarusi / A. A. Volchek // Melioraciya. – 2020. – № 4. – S. 24–29.
32. Pereladova, L. V. Kartografirovaniye statisticheskikh parametrov rechnogo stoka s primeneniem programmnogo kompleksa ArcGis / L. V. Pereladova // Informacionnye tekhnologii v ekologii: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Godu ekologii v Rossii / отв. ред. Т. В. Казиахмедов. – Nizhnevartovsk: Izd-vo Nizhnevart. gos. un-ta, 2018. – S. 94–98.
33. DeMers, Michael. N., 2009. Fundamentals of Geographic Information Systems. 4th edition. New York, N.Y.: John Wiley & Sons, 443 pp.
34. Sanders, L. 2007. Models in Spatial Analysis. Newport Beach, CA, U.S.A: ISTE Ltd, 319 pp.
35. Baillargeon.S. Kriging review of the theory and application to the interpolation of precipitation data. Thesis University of Laval (Quebec) 2005. 137 p.
36. Borga M, Vizzaccaro, A. (1997) On the interpolation of hydrologic variables: formal equivalence of multiquadratic surface fitting and kriging // Journal of Hydrology, 195, pp. 160-171.
37. Orlova, E. V. Opredelenie geograficheskikh i gidrologicheskikh harakteristik vodnykh ob'ektov s ispol'zovaniem GIS-tekhnologij / E. V. Orlova // Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – SPb. : GGI, 2008. 218 s.
38. Volchek, A. A. Ocenka izmeneniya stoka reki Vili na territorii Belarusi / A. A. Volchek // Gidrometeorologiya i ekologiya. – 2016. – № 4. – S. 32–62.

#### References

1. Resursy poverhnostnyh vod SSSR: v 20 t. – L. : Gidrometeoizdat, 1966. – T. 5. CH. 1: Belorussiya i Verhnee Podneprov'e. – 718 s.
2. Posobie k stroitel'nym normam i pravilam. P1-98 k SNiP 2.01.14-83 Opredelenie raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik / N. V. Shevcov [i dr.]; pod obshch. red. N. V. Shevcova. – Minsk : RUP «Minsktiproekt», 2000. – 174 s.
3. Belaruskaya encyklopedyya: u 18 t. / redkal.: G. P. Pashkoŭ (gal. red.) [i insh.]. – Minsk : BelEn, 2002. – T. 15. – 552 s.
4. Loginov, V. F. Sovremennye izmeneniya vodnyh resursov Respubliki Belarus' / V. F. Loginov, A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Geografiya i prirodnye resursy. – 2008. – № 4. – S. 149–154.

Материал поступил в редакцию 24.05.2021