

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE

УДК 556.114.001.24(282.247.326.2)

DOI: 10.34753/HS.2020.2.2.173

ХАРАКТЕРИСТИКА КАЧЕСТВА СТОКА РЕК РОССИИ, ТРАНСГРАНИЧНЫХ С БЕЛАРУСЬЮ, УКРАИНОЙ И КАЗАХСТАНОМ, И ЕГО СВЯЗЬ С БАСЕЙНОВЫМИ ГЕОСИСТЕМАМИ

Э.А. Румянцева, Н.Н. Бобровицкая
*Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Государственный гидрологический
институт», г. Санкт-Петербург, Россия*
bobrovi@ggi.nw.ru

THE QUALITY CHARACTERISTIC OF THE RUSSIA RIVERS RUNOFF, TRANSBOUNDARY WITH BELARUS, UKRAINE, KAZAKHSTAN AND ITS RELATIONSHIP WITH BASIN GEOSYSTEMS

El'vira A. Rumyantseva,
Nelly N. Bobrovitskaya
*Federal State Budgetary Institution "State
Hydrological Institute", St. Petersburg, Russia*
bobrovi@ggi.nw.ru

Аннотация. В связи с использованием природных ресурсов в трансграничных зонах России особое значение в современных условиях имеют геоэкологические проблемы. Целью данной работы явилось изучение взаимосвязи долей объёмов речного стока воды, имеющих сверхнормативные концентрации загрязняющих веществ, с функционированием региональных бассейновых геосистем. Для этой цели были использованы две характеристики качества стока, разработанные в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный гидрологический институт» (ФГБУ «ГГИ»). Первая характеристика – это относительные объёмы стока ($V_{\text{заг}}\%$), загрязнённые единичными компонентами. Вторая представлена частичными объёмами стока, различающимися совокупностью загрязняющих веществ, оценёнными по классам и разрядам в соответствии с РД 52.24.643-2002¹. Расчёты проведены с помощью автоматизированного программного комплекса, разработанного в ФГБУ «ГГИ», по данным режимных наблюдений Управлений гидрометеорологической службы для

Abstract. The aim of this work was to study the relationship between the parts of river water flow volumes that have excess pollutant concentrations and the functioning of regional basin geosystems. For this purpose, two flow quality characteristics were used. The first characteristic is the relative volumes of runoff ($V_{\text{poll}}\%$) contaminated with single components. The second one is represented by partial volumes of runoff, differing in the totality of pollutants, estimated by classes and categories in accordance with Guidance Document 52.24.643-2002¹. The calculations were carried out using an automated software package developed at the FSBI «SHI» according to regime observations of the Hydrometeorological Service of Roshydromet for eighteen transboundary rivers over the entire observation period of 1993-2013. To solve assigned problem factor analysis was applied. The two main factors, the content of which is expressed through fluctuations of $V_{\text{poll}}\%$ for twelve different individual hydro-chemical components, unite the rivers by their belonging to the corresponding water system or basin, that is, of the basin geosystem. Application of the second runoff characteristic made it possible to assess the pollution of river runoff in these

¹РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязнённости поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 48 с.

восемнадцати трансграничных рек. Обе характеристики были усреднены за весь период наблюдений 1993-2013 гг. Для решения поставленной задачи применен факторный анализ. Показано, что два главных фактора, содержание которых выражено через флуктуации $V_{\text{заг}}\%$ для двенадцати разных единичных гидрохимических компонентов, объединяют реки по их принадлежности к соответствующей водной системе или бассейну, то есть связаны с функционированием бассейновой геосистемы. Применение второй характеристики стока позволило оценить загрязнённость стока рек в этих геосистемах. Показано, что в основном все реки, сток которых относится к загрязнённому, то есть второму и третьему классу разряда «а», текут из России в соседние государства. Все реки, трансграничные с Украиной и Казахстаном, сток которых отнесён к четвертому классу разрядов «а», «б» и «в», несут свои более грязные воды из сопредельных государств в Россию.

Ключевые слова: характеристики качества стока; автоматизированный программный комплекс; режимные наблюдения; трансграничные пункты наблюдений; факторный анализ; бассейновые геосистемы; оценка загрязнённости стока рек

Введение

Особое значение в современных условиях имеют геоэкологические проблемы использования трансграничных рек в связи с интенсивным развитием международных, прежде всего, экономических связей, и общих эколого-экономических и эколого-социальных проблем эксплуатации природных ресурсов.

Бассейновые геосистемы разделены границей между сопредельными государствами, в то время как это объекты высокой степени целостности, и представляют собой совокупность природных ресурсов. Водные объекты являются конечными звеньями загрязнения в круговороте вещества и энергии в пределах бассейновых геосистем.

geosystems. It was revealed that basically all the rivers whose runoff belongs to the polluted, that is, the second and third class of category “a”, flow from Russia to neighboring states. All rivers transboundary with Ukraine and Kazakhstan, the flow of which is assigned to the fourth class of categories “a”, “b” and “c”, carry their more dirty waters from neighboring states to Russia.

Keywords: runoff quality characteristics; automated software package; regime observations; transboundary posts of observation; factor analysis; basin geo-systems; assessment of river runoff pollution

Водопотребление на хозяйственно-бытовые и производственные нужды и особенно добыча и переработка полезных ископаемых, зарегулированность рек шлюзами и плотинами ГЭС существенно увеличивают антропогенную нагрузку на всю бассейновую систему и в итоге на водный сток рек.

Формирование величин объёмов речного стока воды, имеющих сверхнормативные концентрации отдельных загрязняющих веществ в этих геосистемах, должно зависеть как от природных условий, так и от их хозяйственного освоения и, по-видимому, может служить маркером их особенностей.

Задачи и методы

Задачей данной работы явилось изучение взаимосвязи объёмов речного стока воды, имеющих сверхнормативные концентрации загрязняющих веществ, с состоянием региональных бассейновых геосистем, с целью показать необходимость их комплексного изучения.

Для решения поставленной задачи были использованы основные положения рекомендаций¹ по применению интегральных показателей, характеризующих изменения загрязнённости водного стока, разработанные в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный гидрологический институт» (далее – ФГБУ «ГГИ») [Караушев, Скакальский, 1973; Караушев, Скакальский, 1979; Скакальский 1980; Методические основы, 1987].

Основной характеристикой речного стока воды в этой методике является относительный объём стока, загрязнённый единичным компонентом ($V_{\text{заг}}\%$). Он выражается отношением объёма стока загрязненной воды ($V_{\text{заг}}$), перенесённой через заданный створ за год, ко всему годовому стоку реки $V_{\text{год}}$.

Новая методика [Румянцева, Бобровицкая, Ильин, 2014] позволяет разделить объём речного стока на частичные объёмы, различающиеся совокупностью загрязняющих веществ, и оценить загрязнённость воды в этих объёмах в соответствии с РД 52.24.643-2002². Основными характеристиками речного стока воды в этой методике являются частичные объёмы стока, загрязнённые совокупностью загрязняющих веществ ($V_{\text{заг}}\%$) разных классов загрязнённости.

В ФГБУ «ГГИ» создан автоматизированный программный комплекс «Оценка показателей загрязнённого и чистого стока» (далее – АПК), с помощью которого возможны расчёты этих характеристик стока

путём совместной обработки больших объёмов гидрологической и гидрохимической стандартной (режимной) информации [Румянцева, Бобровицкая, 2012; Румянцева, Бобровицкая, Ильин, 2014; Румянцева, Бобровицкая, Сухоногова, 2020].

Расчёты для каждой доли объёмов загрязнённого стока осуществляются не только по измеренным, но и по интерполированным значениям концентраций загрязняющих компонентов. Характеристика стока воды за год и за весь период производится с учетом вклада частичных объёмов различной продолжительности и качества.

Для изучения взаимосвязи загрязнённости речного стока с бассейновыми геосистемами были использованы обе характеристики, усреднённые за весь период наблюдений 1993-2013 гг.

В качестве инструмента для решения задачи применен факторный анализ, так как факторы объединяют в одну группу переменные, которые могут быть прямо, или косвенно связаны с некоторым определенным источником или процессом. [Иберла, 1980].

Объекты

В таблице 1 приведён список рек и трансграничных гидрологических и гидрохимических постов, по данным наблюдений на которых производились расчёты характеристик стока с помощью АПК.

В основу расчётов положены гидрологические и гидрохимические данные 1993-2013 гг., полученные в результате режимных наблюдений Управления гидрометеорологической службы Центральные Черноземных Областей, а также Северо-Западного, Центрального, Северо-Кавказского, Приволжского, Уральского и Обь Иртышского Управлений гидрометеорологической службы.

¹Рекомендации по применению интегральных показателей для оценки качества воды и загрязнённости рек и водоемов. Л.: ГГИ, 1977. 72 с.

²РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязнённости поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. 48 с.

Сравнение рек по объёмам годового стока воды на трансграничных постах, усреднённым за период с 1993 по 2013 гг.

Для сравнения изучаемых рек по количественным характеристикам водного стока на рисунке 1 показаны их минимальные, максимальные и средние объёмы годового стока воды, усреднённые за период 1993-2013 гг. на трансграничных постах наблюдений.

Средние за период с 1993 по 2013 гг. объёмы стока в реках варьируют в широком диапазоне: от 0,11 км³/год (р. Псёл) до 24,7 км³/год (р. Иртыш). Второе место по объёму стока занимает река Днепр – 15 км³/год. В реках Западная Двина, Северский Донец, Ипуть и Десна средний многолетний объём речного стока находится в пределах от 2,6 до 4,8 км³ в год (реки ранжированы в порядке уменьшения объёма стока).

Реки Сейм и Тобол имеют близкие средние многолетние объёмы стока в пределах 1,4 и 1,66 км³/год.

К рекам, имеющим средние многолетние объёмы стока воды менее 1 км³/год, относятся Илек, Уй, Сож, Оскол, Судость, Большой Узень, Миус, Малый Узень, Ворскла и Псёл. Они перечислены также в порядке уменьшения объёма стока от 0,71 до 0,11 км³/год. Следует отметить, что река Днепр имеет самую значительную в изучаемом ряду рек амплитуду между максимальным и минимальным значением объёмов стока.

Характеристика рек на трансграничных постах по относительным объёмам стока, загрязнённого единичными химическими компонентами

В таблице 2 представлены усреднённые за весь период наблюдений 1993-2013 гг. относительные объёмы стока рек ($V_{\text{заг}}\%$), загрязнённого единичными химическими компонентами, на трансграничных гидрохимических пунктах наблюдений.

Далее для удобства изложения материала доля объёма стока, загрязнённого единичным

химическим компонентом, условно будет называться:

- значительной - более 70%;
- в средних пределах – в диапазоне 30-70%;
- ниже средних пределов – в диапазоне 10-30%;
- низкой – в диапазоне 1-10%;
- незначительной – менее 1%.

Как следует из таблицы 2, в преобладающем большинстве рек значительная доля объёма стока загрязнена органическими веществами по ХПК, лабильными органическими веществами по БПК₅, Fe_{общ} и Cu²⁺. В меньшем количестве рек она была в средних пределах, в единичных случаях ниже средних. В одной реке $V_{\text{заг}}\%$ для Cu²⁺ был незначителен и в одной совсем отсутствовал.

Доля объёма стока, загрязнённого азотсодержащими биогенными компонентами, в большинстве рек находится в средних и ниже средних пределов. Только в четырех реках объём стока, загрязнённого NO₂⁻, значителен. $V\%$, загрязнённый Р_{мин}, в большинстве рек, трансграничных с Украиной, ниже средних пределов, а в реках на границе с Беларусью и Казахстаном низкий, незначительный либо совсем отсутствует.

Из специфических загрязняющих веществ доля объёма стока, загрязнённая только нефтепродуктами, достигает значительных величин в четырёх реках, а в остальных случаях находится в основном в средних и ниже средних пределов. В трёх реках загрязнение нефтепродуктами полностью отсутствует. Относительный объём стока, загрязнённый фенолами, находится в средних и ниже средних пределов и отсутствует в четырёх реках.

Объём стока, загрязнённого СПАВ, низкий или незначительный, нет загрязнения стока СПАВ в восьми реках.

Значительные величины $V_{\text{заг}}\%$ для SO₄²⁻ отмечены в четырех реках, для Mg²⁺ – в двух. Почти во всех реках на границе с Украиной и Беларусью загрязнение этими ионами либо отсутствует либо является низким и незначительным. В реках на границе с Казахстаном $V_{\text{заг}}\%$ для Mg²⁺ и SO₄²⁻ в основном находится ниже среднего уровня.

Таблица 2. Относительные объёмы стока рек, загрязнённые единичными химическими компонентами, усреднённые за период 1993-2013 гг.

Table 2. Average for the period 1993-2013 relative volumes of runoff contaminated by single hydrochemical components

Река	V _{заг} %											
	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Нефте-продукты	Фенолы	СПАВ	P _{мин}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	Cu ²⁺	БПК ₅	ХПК	Fe _{общ.}
Граница России с Беларусью												
Западная Двина	0,4	0	19,2	41,3	18,5	3,2	13,9	13,3	75,3	51,3	87,0	97,8
Днепр	0,5	0	24,3	45,7	27,5	1,6	20,0	39,1	84,8	79,2	89,2	96,6
Сож	4,0	0	18,8	18,4	0	0	5,1	6,3	74,1	51,9	91,0	91,0
Ипуть	0	0	0	0	0	0,4	60,5	15,7	0	83,9	93,5	99,7
Граница России с Украиной												
Судость	0	0	0	-	0	9,1	58	46,1	0,8	96,7	99,6	99,4
Десна	0	0	0	0	0	1,8	55,4	27,9	-	80,2	94,0	98,1
Сейм	0	0	55,1	0,3	4,2	26,5	26,5	60,9	76,6	49,5	68,6	48,7
Псел	0,7	2,6	70,2	0	7,2	22,3	42	77,2	99	68,2	91,6	26,4
Ворскла	1	21,4	52,8	25,0	0,7	38,7	56,8	39,6	39,2	71,5	35,1	49,0
Оскол	0	9,1	56,0	36,9	0	25,7	31,6	78,4	47,9	62,2	35,1	31,1
Северский Донец	76,9	100	74,1	14,1	0	22	21,6	100	59,3	71,2	96,4	82,0
Миус	97,4	100	79,5	57,7	0	12,6	17,1	59,9	81,3	85,4	95,4	84,6
Граница России с Казахстаном												
Большой Узень	26,1	15,2	17,9	31,1	2,5	6,8	39,9	54,1	52,0	37,1	99,4	61,7
Малый Узень	14,7	13,3	20,2	35,8	2,5	8,1	36,2	49,9	57,0	24,6	99,2	47,5
Илек	5,2	49,2	36,9	0	0	9,4	45,8	94,4	64,2	100	100	37,6
Иртыш	0	0,1	60,6	56,2	1,9	0,1	28,4	9,8	98,1	46,4	60,4	69,5
Тобол	28,6	90,5	66,3	31,6	3,8	-	59,7	24,4	99,4	-	91,3	92,1
Уй	19,4	80,0	75,3	32,4	0,2	-	26	32,2	99,7	-	91,4	93,7

Примечание. Знак «-» означает отсутствие измеренных единичных химических компонент.

Группирование 18 рек, трансграничных с Украиной, Беларусью и Казахстаном, по относительным объёмам стока, загрязнённого двенадцатью единичными химическими компонентами, с использованием факторного анализа

Показать в чём сходство и различие между сравниваемыми реками по сочетанию относительных объёмов стока, загрязнённых

двенадцатью разными единичными компонентами, возможно применив факторный анализ, с помощью которого используется дисперсия большого числа эмпирических данных.

Мерой сходства между сравниваемыми реками явилась корреляционная матрица, которая обрабатывалась по методу главных компонент, в результате чего была получена матрица главных факторов, выражающая состав факторов через исходные переменные.

Таблица 3. Матрица основных факторов, определяющих варьирование, усреднённых за период 1993-2013 гг. относительных объёмов стока, загрязнённых единичными химическими компонентами, в ряду восемнадцати трансграничных рек

Table 3. A matrix of the main factors determining the variation, averaged over the period 1993-2013 relative volumes of runoff contaminated by single hydrochemical components for eighteen transboundary rivers

Переменные	Без вращения		После вращения	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
$V_{\text{заг}} \% \text{Mg}^{2+}$	-0,653079	-0,300413	0,717286	0,047544
$V_{\text{заг}} \% \text{SO}_4^{2+}$	-0,930024	-0,019749	0,826787	0,426332
$V_{\text{заг}} \% \text{Нефтепродукты}$	-0,870939	-0,301359	0,909207	0,150647
$V_{\text{заг}} \% \text{Фенолы}$	-0,720529	0,171919	0,551229	0,494838
$V_{\text{заг}} \% \text{СПАВ}$	-0,805543	0,342015	0,544797	0,684886
$V_{\text{заг}} \% \text{P}_{\text{мин}}$	-0,878793	-0,049973	0,796181	0,375327
$V_{\text{заг}} \% \text{NH}_4^+$	-0,795922	0,086969	0,658017	0,456146
$V_{\text{заг}} \% \text{NO}_2^-$	-0,831623	0,492014	0,496158	0,829158
$V_{\text{заг}} \% \text{Cu}^{2+}$	-0,793782	-0,539589	0,955050	-0,095535
$V_{\text{заг}} \% \text{БПК}_5$	-0,898343	0,022150	0,778955	0,448041
$V_{\text{заг}} \% \text{ХПК}$	-0,475535	0,696612	0,085597	0,839092
$V_{\text{заг}} \% \text{Fe}_{\text{общ}}$	-0,712927	-0,392292	0,813718	-0,004654
Доля общей дисперсии, %	62,39	12,59	51,11	23,92

Из таблицы 3 следует, что на варьирование относительных объёмов стока в трансграничных пунктах восемнадцати рек, загрязнённых единичными химическими компонентами, в основном оказывает влияние фактор 1, состав которого выражен через выделенные в таблице полужирным шрифтом объёмы стока, загрязнённые десятью единичными компонентами. Этот фактор составляет более 60% суммарной дисперсии. Фактор 2 составляет немного более 12% суммарной дисперсии. Уменьшение доли фактора 1 путём вращения осей, позволяет увидеть состав фактора 2 через варьирование относительных объёмов стока, загрязнённых NO_2^- , ХПК, а при большем уменьшении влияния фактора 1 и СПАВ.

Далее (рисунок 2) по численным значениям первых двух факторов было произведено группирование случаев (трансграничных пунктов рек).

Очевидно, что в левой части графика расположены все реки, трансграничные с Беларусью и Украиной, а в правой – трансграничные с Казахстаном.

Реки, трансграничные с Казахстаном, относящиеся к водной системе Тобол – Иртыш – Обь – Карское море, расположены в нижней правой части графика.

Особое место среди них занимает Иртыш¹ (точка 1) – самая длинная река-приток в мире, которая течёт из Казахстана в Россию. Река Иртыш жизненно важная артерия не только для Казахстана, но и для всего региона Евразии. Река берет начало в Китае на восточных склонах хребта Монгольский Алтай. В целом благополучие казахстанского и российского участков реки зависит от действий Китая. Китай отбирает часть стока верхнего (Черного) Иртыша. Согласно экспертным оценкам, за последние тридцать лет сток Иртыша уменьшился в 3 раза. Безусловно, интенсивное потребление иртышской воды тремя крупнейшими странами материка Евразия не может не сказываться на состоянии реки. Следует отметить, что проекция реки на графике существенно удалена от проекции притоков.

¹Иртыш // Малый энциклопедический словарь: в 4 т. Т. 3. СПб.: Брокгауз-Ефрон, 1907.

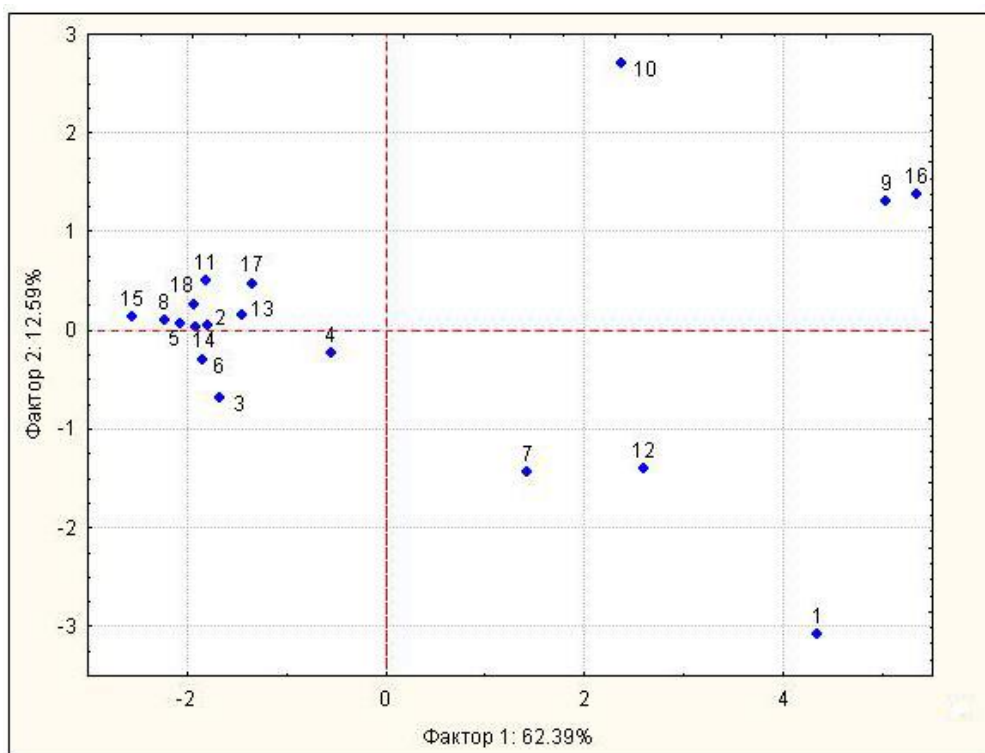


Рисунок 2. Проекция случаев (трансграничных пунктов рек) в координатах главных факторов, определяющих варьирование усреднённых за 1993-2013 гг. величин $V_{заг}\%$ для единичных химических компонентов в ряду восемнадцати трансграничных рек. Индексы соответствуют рекам: 1 – Иртыш, 2 – Ипуть, 3 – Западная Двина, 4 – Северский Донец, 5 – Днепр, 6 – Десна, 7 – Тобол, 8 – Сейм, 9 – Большой Узень, 10 – Илек, 11 – Оскол, 12 – Уй, 13 – Сож, 14 – Судость, 15 – Миус, 16 – Малый Узень, 17 – Ворскла, 18 – Псёл

Figure 2. Projection of cases (transboundary river points) in the coordinates of the main factors determining the variation of averaged for 1993-2013 values $V_{пол}\%$ for single hydrochemical components. Indexes correspond to rivers: 1 – Irtysh, 2 – Iput, 3 – Zapadnaya Dvina, 4 – Seversky Donets, 5 – Dnipro, 6 – Desna, 7 – Tobol, 8 – Seim, 9 – B. Uzen, 10 – Ilek, 11 – Oskol, 12 – Uy, 13 – Sozh, 14 – Sudost, 15 – Mius, 16 – M. Uzen, 17 – Vorskla, 18 – Psel

Река Тобол (точка 7) – левый и самый многоводный приток Иртыша [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1980], течёт из Казахстана в Россию. Данная река образуется на границе восточных отрогов Южного Урала и Тургайской столовой страны. Река Уй (точка 12) является притоком реки Тобол [Государственный водный кадастр, 1978]. Исток реки – подножье хребта Алабия. Протекает она вдоль границы с Казахстаном.

Особое место в правой верхней части графика занимает река Илек (точка 10), являющаяся самым крупным левобережным притоком реки Урал [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1966]. Его истоки находятся на северо-западных склонах Мугоджар. Она течёт из

Казахстана в Россию и относится к водной системе Урал→Каспийское море.

В правой верхней части графика находятся две очень схожие реки Большой Узень (точка 9) и Малый Узень (точка 16). Обе реки относятся к водной системе Камыш – Самарские озёра [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1966]. Они берут начало в России и текут в Казахстан. Это – степные реки внутреннего стока. Большой Узень берёт начало на юго-западных склонах Общего Сырта, Малый Узень зарождается в Ершовском районе Саратовской области. В Казахстане реки переходят в обширную систему мелких озёр и болот, известных под именем Камыш-Самарских. С 1973 года Саратовским оросительно-обводнительным каналом каждый год с апреля по

ноябрь осуществляется подача волжской воды в исток Большого Узенья. Проекция обеих рек на графике находятся рядом.

Большинство рек, трансграничных с Беларусью и Украиной, относятся к водной системе Днепр – Чёрное море [Государственный водный кадастр, 1984] и текут из России в Беларусь или Украину. У реки Днепр (точка 5) исток находится у деревни Бочарово, его устье - Днепровский лиман в Черном Море. Реки Сож (точка 13), Ворскла (точка 17), Десна (точка 6) и Псёл (точка 18) являются одними из многочисленных притоков реки Днепр и относятся к той же водной системе. Приток реки Сож река Ипуть (точка 2) и притоки реки Десна река Сейм (точка 8) и река Судость (точка 14) соответственно тоже относятся к водной системе Днепр – Чёрное море. Точки с номерами этих рек на графике образуют довольно плотное облако в левой части графика.

Немного ниже его находится точка 3 – река Западная Двина¹. Она берёт своё начало в России на Валдайской возвышенности и впадает в Рижский залив Балтийского моря в городе Рига. Река относится к водной системе Балтийского моря.

Река Миус (точка 15) течёт из Украины в Россию [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1975]. Она берёт начало на склонах Донецкого кряжа и впадает в Миусский лиман. Река относится к водной системе река Миус – Азовское море. Точка 15 находится немного левее плотного облака точек.

Река Северский Донец (точка 4) – самая крупная река восточной Украины и наиболее крупный приток Дона [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1964]. Северский Донец берёт начало на Среднерусской возвышенности, около села Подольхи в Прохоровском районе Белгородской области России. Река течёт через Украину в Россию и впадает в реку Дон. Река образует водную систему Северский Донец – Дон →

Азовское море. Крупнейший приток Северского Донца – река Оскол (точка 11), её исток находится в селе Погожее Тимского района Курской области. Оскол течёт из России в Украину, впадает в Северский Донец. Но несмотря на то, что он относится к той же водной системе, на графике проекция трансграничного пункта реки находится от него в удалении и существенно ближе к рекам водной системы Днепр – Чёрное море.

Таким образом, два главных фактора через относительные объёмы стока восемнадцати рек, загрязнённых двенадцатью единичными химическими компонентами, усреднёнными за двадцать один год, в основном объединяют реки по их принадлежности к соответствующей водной системе.

Группы рек распределены не только вдоль оси основного фактора 1, но и фактор 2 оказывает существенное влияние на вертикальное ранжирование проекций рек. Наиболее чётко вдоль оси фактора 2 на четыре группы разделились реки России, трансграничные с Казахстаном (таблица 4). Сочетанием наибольшего расхода воды и площади водосбора, а также модулем стока 1,31 л/км² отличается река Иртыш (точка 1). Она занимает особое положение на рисунке 2. Меньше расход воды и площади водосборов, а также более низкие показатели модуля стока у рек Тобёл и Уй. Их проекции расположены на графике достаточно близко. Река Илек имеет при таком же расходе воды как река Уй более высокий модуль стока с водосбора и проектируется на рисунке 2 особняком. Реки Большой и Малый Узени достаточно близки по представленным показателям и их проекции находятся на рисунке рядом, что говорит о взаимосвязи варьирования в ряду рек относительных объёмов загрязнённого стока с их бассейновыми геосистемами.

¹ Западная Двина (река) // Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т.9 / гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1972. 608 с.

Таблица 4. Реки России, трансграничные с Казахстаном, объединённые в группы по средним за 1993-2013 гг. расходам воды, модулям стока и площадям водосборов

Table 4. Rivers of Russia, transboundary with Kazakhstan, grouped by average for 1993-2013 water, flow rates, modulus and catchment areas

Группы	№ на графике	Реки	Гидрологические пункты наблюдений	$Q_{ср.}$, м ³ /с	Площадь водосбора в пункте наблюдений, км ²	Модуль стока с водосбора л/км ²
1	1	Иртыш	с. Татарка	782,1	596000	1,31
2	7	Тобол	с. Звериноголовское	44,5	143000	0,31
	12	Уй	с Усть-Уйское	22,2	34400	0,65
3	10	Илек	п. Весёлый	22,7	17200	1,32
4	9	Большой Узень	г. Новоузенск	12,8	7480	1,71
	16	Малый Узень	с. Малый Узень	5,8	3930	1,48

Группирование рек, трансграничных с Украиной и Беларусью, относящихся к водной системе Днепр – Чёрное море, по относительным объёмам стока, загрязнённого единичными химическими компонентами, с использованием факторного анализа

Для подтверждения взаимосвязи варьирования в ряду рек относительных объёмов стока, загрязнённых единичными химическими компонентами, с их бассейнами было произведено группирование рек, относящихся к одной водной системе Днепр – Чёрное море (таблица 5).

Из таблицы 5 следует, что на варьирование долей объёмов стока, загрязнённых единичными гидрохимическими компонентами, в трансграничных пунктах восьми рек в основном оказывает влияние фактор 1. Состав фактора выражен через выделенные в таблице полужирным шрифтом относительные объёмы стока, загрязнённого шестью единичными компонентами. Этот фактор составляет более 50% суммарной дисперсии. Фактор 2 составляет немного более 22% суммарной дисперсии и реализуется через $V_{заг}^{\%}$ для $Fe_{общ}$ и $V_{заг}^{\%}$ для Cu^{2+} .

Уменьшение роли фактора 1 путём вращения осей, усиливает значение $V_{заг}^{\%}$ для фенолов.

По численным значениям первых двух факторов было произведено группирование (рисунок 3) случаев (трансграничных пунктов рек).

В координатах двух главных факторов трансграничные пункты рек водной системы Днепр – Чёрное море разделились на 5 групп (рисунок 3, таблица 6). Как оказалось, эти группы рек также отличаются по величинам средних расходов воды и модулями стока за период 1993-2013 гг., а также размерами площадей водосборов.

Так, в первой группе рек $Q_{ср}$ находится в пределах 488,7-83,3 м³/с, значения модуля стока с водосбора варьируют от 34,66 до 6,08 л/км². В реках второй группы значения $Q_{ср}$ варьирует в пределах 52,6-19,8 м³/с и модуль стока – 3,82-2,91 л/км². Река Сож (условно третья группа) хотя и имеет значение $Q_{ср}$ 22,0 м³/с, отличается от предыдущей группы рек более высоким значением модуля стока 8,46 л/км². Реки Ворскла и Псёл (условно четвёртая и пятая группы) очень близки по всем показателям, но, несмотря на этот факт, обе реки имеют резко различные проекции по фактору 2.

Эти данные подтверждают, что флуктуации относительных объёмов стока, загрязнённого

единичными химическими компонентами, в ряду рек являются отражением функционирования соответствующей бассейновой геосистемы.

Для того чтобы раскрыть содержание фактора 2, необходимо выяснить в чём особенности рек Псёл, Ворскла и Сож, проекции которых ранжированы вдоль его оси. Территории формирования стока этих рек находятся в разных частях Восточно-Европейской (Русской) равнины и разных административных высоко освоенных областях Российской Федерации. Сток реки Сож формируется в западной и центральной части равнины в Смоленской области, реки Псёл – в центральной части Восточно-Европейской равнины Курской области. Река Ворскла

начинается в юго-западных и южных склонах Среднерусской возвышенности Белгородской области России. Качество речного стока воды зависит не только от природных, но и в значительной мере от антропогенных нагрузок в бассейновых трансграничных геосистемах.

В географическом аспекте на территории трансграничной зоны с севера на юг и юго-запад уменьшается удельный вес площади водосбора, покрытой лесом, и соответственно увеличивается распаханность водосбора с 30-33% территории на севере до 63-65% – на юге¹. В настоящее время в Курской области распаханно до 80% водосборов [Головина, 2015].

Таблица 5. Матрица основных факторов, определяющих варьирование, усреднённых за период 1993-2013 гг. относительных объёмов стока, загрязнённых единичными химическими компонентами, в ряду восьми трансграничных рек, относящихся к водной системе Днепр – Чёрное море

Table 5. Matrix of the main factors determining the variation, averaged over the period 1993-2013, of the relative volumes runoff polluted by single chemical components, in a series of eight transboundary rivers belonging to the Dnieper – Black Sea water system

Переменные	Без вращения факторных осей		После вращения факторных осей	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
$V_{\text{заг}}\% \text{Mg}^{2+}$	-0,153526	-0,416246	-0,040831	-0,029933
$V_{\text{заг}}\% \text{SO}_4^{2-}$	-0,886420	-0,301759	0,857681	-0,009615
$V_{\text{заг}}\% \text{Нефтепродукты}$	-0,848291	0,089501	0,842952	0,252054
$V_{\text{заг}}\% \text{Фенолы}$	0,558808	-0,674788	-0,332796	-0,897074
$V_{\text{заг}}\% \text{СПАВ}$	-0,865271	-0,172986	0,760535	0,189883
$V_{\text{заг}}\% \text{P}_{\text{мин}}$	-0,930511	0,036478	0,971720	0,093774
$V_{\text{заг}}\% \text{NH}_4^+$	0,550265	0,684755	-0,670050	0,619405
$V_{\text{заг}}\% \text{NO}_2^-$	-0,930511	0,036478	0,971720	0,093774
$V_{\text{заг}}\% \text{Cu}^{2+}$	-0,125285	0,822950	0,047271	0,671221
$V_{\text{заг}}\% \text{БПК}_5$	-0,930511	0,036478	0,971720	0,093774
$V_{\text{заг}}\% \text{ХПК}$	-0,578503	-0,314441	0,414523	0,061197
$V_{\text{заг}}\% \text{Fe}_{\text{общ}}$	0,466270	-0,818918	-0,277466	-0,945016
Доля общей дисперсии, %	50,48	22,31	47,25	22,19

¹ Доклад «О состоянии и охране окружающей среды на территории курской области в 2009 г.» Курск: Минприроды, 2010. 172 с.

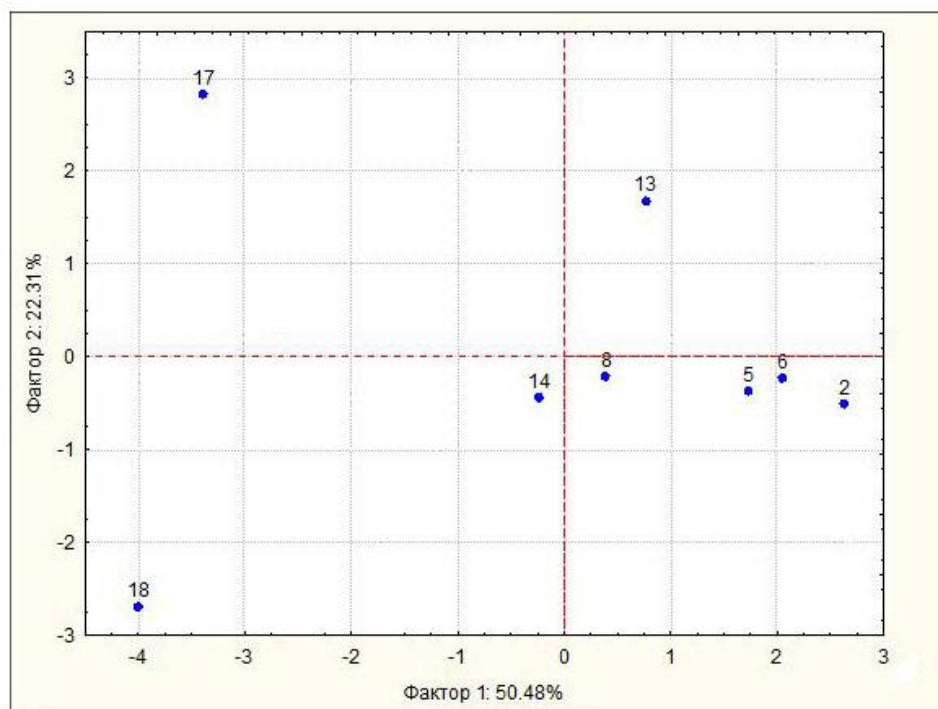


Рисунок 3. Проекция случаев (трансграничных пунктов рек водной системы Днепр – Чёрное море) в координатах главных факторов, определяющих варьирование усреднённых за 1993-2013 гг. величин $V_{\text{заг}}\%$ для единичных химических компонентов, в ряду восьми трансграничных рек. Индексы соответствуют рекам:

2 – Ипуть, 5 – Днепр, 6 – Десна, 8 – Сейм, 13 – Сож, 14 – Судость, 17 – Ворскла, 18 – Псёл

Figure 3. Projection of cases (transboundary points of the rivers of the Dnieper-Black Sea water system) in the coordinates of the main factors determining the variation of the values $V_{\text{poll}}\%$ averaged for 1993-2013 for single hydrochemical components. Indexes correspond to rivers:

2 – Iput, 5 – Dnipro, 6 – Desna, 8 – Seim, 13 – Sozh, 14 – Sudost, 17 – Vorskla, 18 – Psel

Таблица 6. Реки водной системы Днепр – Чёрное море, объединённые в группы по средним за 1993-2013 гг. расходам воды, модулям стока и площадям водосборов

Table 6. Rivers of the Dniper – Black Sea water system, grouped by average for 1993-2013 water flow rates, flow modules and catchment areas

Группы	№ на рисунке	Реки	Гидрологические пункты наблюдений	$Q_{\text{ср.}}$, м ³ /с	Площадь водосбора в пункте наблюдений, км ²	Модуль стока с водосбора, л/км ²
1	5	Днепр	г. Смоленск	488,7	14100	34,66
	2	Ипуть	с. Ущерпье	114,6	8110	14,13
	6	Десна	г. Брянск	83,3	13700	6,08
2	8	Сейм	г. Рыльск	52,6	18100	2,91
	14	Судость	г. Погар	19,8	5180	3,82
3	13	Сож	д. Ускосы	22,0	2600	8,46
4	17	Ворскла	с. Козинка	5,7	1870	3,05
5	18	Псёл	г. Обоянь	3,4	1100	3,09

Коэффициент увлажнения уменьшается по направлению с северо-запада на юго-восток, от зоны неустойчивого увлажнения к зоне недостаточного увлажнения. В сельском хозяйстве наиболее водоемкий потребитель – орошение. Из поступающей на поля орошения воды в речную сеть возвращается иногда меньше 10%. Вместе с тем в засушливых и полузасушливых районах орошение является жизненно необходимым для производства сельскохозяйственной продукции [Головина, 2015]. Водопотребление на хозяйственно-бытовые и производственные нужды и, особенно, добыча и переработка полезных ископаемых существенно увеличивают антропогенную нагрузку на реки. Верховья рек Псёл и Ворскла находятся в пределах Курской Магнитной аномалии. На Яковлевском руднике железные руды добывают шахтным способом, и шахтные воды через пруд отстойник сбрасывают в Ворсклу [Лобода, Пилипюк, 2012].

Разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается резким снижением уровня подземных вод, выемкой и перемещением пустых и рудосодержащих пород при открытом способе добычи, образованием открытых карьеров, котлованов, стволов шахт, открытых и закрытых резервуаров, оседанием земной коры, дамб, плотин и других искусственных форм рельефа [Корнилов и др., 2010].

Реки Псёл и Ворскла зарегулированы шлюзами-регуляторами и плотинами ГЭС. У села Крапивное Белгородской области России на реке Ворскла находится водохранилище площадью 110 га и объемом воды 3,41 млн. м³. Речной режим, искусственно трансформированный в озерный водообмен, замедлился, образовались зоны застоя. Водоохранилища существенно ухудшили состояние прилегающих территорий: повысился уровень грунтовых вод даже на достаточно больших расстояниях от берегов, усилилась эрозия береговой зоны [Головина, 2015].

Реки Европейской территории России относятся к рекам Восточно-Европейского типа

водного режима. Для них свойственно прохождение более 50% годового стока за период весеннего половодья. За последние 30 лет водный режим рек данной территории претерпел серьезные изменения. Этот период был не только самым теплым, но и самым влажным за время наблюдений. Важным следствием этого служит рост потерь талого стока и повышенное питание подземных вод. Увеличение водности маловодного периода и снижение экстремальности маловодий фиксируется практически для всех рек Европейской территории России [Фролова и др., 2015].

Однако динамика превышения верхнего порогового значения (10% обеспеченности) имеет разнонаправленный характер. При этом количество экстремально маловодных и экстремально многоводных периодов связано между собой: коэффициент корреляции этой зависимости более 0,7. Таким образом, каждая река, обладая своими особенностями водного режима, имеет некую общую характеристику «экстремальности», характеризующую как количество маловодий, так и количество многоводий [Езерова, Киреева, Фролова, 2018].

Интерпретировать содержание фактора 2 без дополнительных данных весьма сложно. Хотя, можно предположить, что именно различия в общей характеристике «экстремальности» и даёт различный вклад в колебания $V_{\text{заг}}\%$ для $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cu^{2+} и фенолов в этих реках, что требует дополнительных исследований.

Характеристика рек на трансграничных постах по относительным объёмам стока, загрязнённого совокупностью химических компонентов

В таблице 7 представлены усреднённые для всего периода наблюдений характеристики состояния загрязнённости стока, оценённые по классам и разрядам, а также дана средняя многолетняя оценка качества стока в долях $V_{\text{заг}}\%$, в соответствии с РД 52.24.643-2002.

Таблица 7. Характеристики качества речного стока по совокупности загрязняющих веществ, усреднённая за период 1993-2013 гг.
 Table 7. Characteristics of the quality of river runoff by the aggregate of pollutants, averaged over the period 1993-2013

Пограничное государство	Река	Средняя многолетняя характеристика качества речного стока		Усреднённые за период 1993-2013 гг. частичные объёмы разной степени загрязнённости, оценённой по классам и разрядам														
		Характеристика стока воды	Класс разряд	1	2	3 «а»	3 «б»	4 «а»	4 «б»	4 «в»	4 «г»	5						
Беларусь	Ипуть			20,81	60,89	18,3												
	Судость			2,67	78,08	18	0,75	0,51										
Украина	Десна			15,64	75,31	9,05												
	Сейм			28,83	46,94	19,51	4,59	0,13										
	Полл			6,32	61,09	22,26	5,25	5,09										
	Ворскла			24,51	43,61	12,45	9,93	4,74	4,76									
Беларусь	Днепр			1,6	23,49	21,5	26,87	22,35	4,19									
	Зап. Двина			4,49	20,98	28,76	29,65	14,69	1,43									
	Сож			6,46	31,67	31,34	17,46	13,07										
Украина	Оскол			11,24	40,45	20,81	11,68	15,82										
	Мпус				28,53	27,84	14,5	22,48	6,29	0,36								
	М. Узень			12,27	35,92	16,84	6,92	17,67	0,81	9,57								
Казахстан	Илек				16,96	40	25,05	15,62	2,37									
	Б. Узень			2,35	13,08	14,49	41,4	14,3	11,01	3,37								
Украина	Северский Донец				16,54	3,55	16,3	27,98	25,88	4,15	5,6							
	Иртыш		Грязный	13,29	18,87	8,23	3,58	10,29	30,15	15,13	0,46							
Казахстан	Тобол		Грязный		6,68	0,05	2,33	12,94	16,6	39,16	11,38	10,86						
	Уй		Очень грязный			0,12	1,07	9,44	21,73	19,39	16,96	31,29						

Из 18 рек 6 на трансграничных постах имеют слабо загрязнённый сток второго класса. Это одна река, трансграничная с Беларусью: Ипать; и 5 рек, трансграничных с Украиной: Судость, Десна, Сейм, Псёл и Ворскла. Водный сток 7 рек является загрязнённым третьего класса разряда «а». К этим рекам относятся 3 реки на границе с Беларусью: Днепр, Западная Двина и Сож; 2 реки на границе с Украиной: Оскол и Миус; а также 2 реки на границе с Казахстаном: Малый Узень и Илек. Ещё в одной реке на границе с Казахстаном в Большом Узене сток очень загрязнённый третьего класса разряда «б». Грязный сток четвёртого класса разряда «а» характерен для реки Северский Донец, трансграничной с Украиной, и реки Иртыш, трансграничной с Казахстаном. На границе с Казахстаном ещё более грязным стоком отличаются две реки. Река Тобол имеет сток четвёртого класса разряда «б» и река Уй отличается очень грязным стоком четвёртого класса разряда «в».

Эти оценки дают только самую обобщённую характеристику качества стока воды. Сток этих рек не однороден и содержит различные доли частичных объёмов разной степени загрязнённости, которые в свою очередь можно оценить по классам и разрядам (таблица 7). Даже сток реки, оценённый как слабо загрязнённый, состоит из трёх, пяти и даже шести, как в реке Ворскла, частичных объёмов разных классов загрязнённости. Однако преобладающей долей стока является $V_{\text{заг}}\%$ второго класса, а доля объёмов загрязнённого и грязного стока ничтожно мала.

Сток рек, классифицированный как загрязнённый, состоит из пяти-семи частичных объёмов. В стоке этих рек заметно уменьшение $V_{\text{заг}}\%$ второго класса и увеличение частичных объёмов загрязнённого и очень загрязнённого стока третьего класса разрядов «а» и «б», а в некоторых случаях и грязного стока воды четвёртого класса разряда «а». При этом доли условно чистого стока первого класса и очень загрязнённого стока четвёртого класса разряда «б» и «в» минимальны.

В стоке рек, оценённом как грязный четвёртого класса разряда «а» и разряда «б», частичные объёмы первого, второго и третьего классов обоих разрядов существенно уменьшаются, в тоже время увеличиваются доли более загрязнённых частичных объёмов четвёртого класса «а», «б» и «в». В случае очень грязного стока, как в реке Уй, увеличиваются доли его частичных объёмов четвёртого класса разряда «г» и даже пятого класса.

В таблице 8 представлены характеристики качества речного стока водных систем по их принадлежности к соответствующей водной системе и приведены данные о состоянии загрязнённости их стока.

Обращает на себя внимание, что сток рек водной системы Днепр – Чёрное море в шести трансграничных пунктах является слабо загрязнённым второго класса и только в двух (реки Днепр и Сож) сток оценивается, как загрязнённый третьего класса разряда «а».

К загрязнённому стоку третьего класса разряда «а» относится сток рек водных систем: Урал – Каспийского, Азовского и Балтийского морей, а также водной системы Камыш – Самарских озёр. Исключением является сток реки Большой Узень, который является очень загрязнённым третьего класса разряда «б».

Сток рек в водной системе Иртыш – Обь – Карское море грязный и очень грязный четвёртого класса разрядов «а», «б» и «в».

В водной системе Северский Донец – Дон – Азовское море река Северский Донец и её приток имеют разные характеристики стока. Сток реки грязный четвёртого класса разряда «а», а сток притока загрязнённый третьего класса разряда «а». Они пересекают государственную границу в противоположных направлениях.

Следует отметить, что почти все реки, сток которых относится ко второму, третьему классу разрядов «а» и «б», кроме рек Миус и Илек, текут из России в соседние государства. Все реки четвёртого класса разрядов «а», «б» и «в», трансграничные с Украиной и Казахстаном, несут свои грязные и очень грязные воды из сопредельных государств в Россию.

Таблица 8. Сравнение характеристик качества речного стока водных систем, вычисленных по совокупности загрязняющих веществ

Table 8. Comparison of water systems according to the characteristics of river flows, calculated by the totality of pollutants

Водная система	Реки и направление течения*	Характеристика стока воды	Класс Разряд
Иртыш – Обь- Карское море	Иртыш (+)	Грязный	4 «а»
	Тобол (+)	Грязный	4 «б»
	Уй (0)	Очень грязный	4 «в»
р. Урал – Каспийское море(+)	Илек (+)	Загрязненный	3 «а»
Камыш – Самарские озёра.	Малый Узень (-)	Загрязненный	3 «а»
	Большой Узень (-)	Очень загрязненный	3 «б»
Днепр – Чёрное море	Днепр (-,0)	Загрязненный	3 «а»
	Сож (0)	Загрязненный	3 «а»
	Ворскла (-)	Слабо загрязненный	2
	Десна (-)	Слабо загрязненный	2
	Псёл (-)	Слабо загрязненный	2
	Ипуть (-,0)	Слабо загрязненный	2
	Сейм (-)	Слабо загрязненный	2
	Судость (-)	Слабо загрязненный	2
Азовское море	Миус (+)	Загрязненный	3 «а»
Северский Донец – Дон – Азовское море	Северский Донец (+)	Грязный	4 «а»
	Оскол (-)	Загрязненный	3 «а»
Балтийское море	Западная Двина (-)	Загрязненный	3 «а»

* Примечание: (0) – река течёт вдоль границы, (-) – из России в пограничное государство, (+) – из пограничного государства в Россию.

Таблица 9. Матрица основных факторов, определяющих варьирование, усреднённых за период 1993-2013 гг. частичных объёмов стока, загрязнённых совокупностью химических компонентов и различающихся по классам и разрядам, в ряду восемнадцати трансграничных рек

Table 9. Matrix of the main factors determining the variation, averaged over the period 1993-2013, of the partial volumes of runoff contaminated by sets of hydrochemical components and estimated by classes and ranks for eighteen transboundary rivers

Переменные (объём, класс и разряд)	Без вращения факторных осей			После вращения факторных осей		
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
$V_{\text{заг}}\% 1$	0,594275	0,040590	-0,211237	-0,571608	-0,242521	-0,117811
$V_{\text{заг}}\% 2$	-0,824133	-0,195251	0,394340	0,898144	0,200425	0,161213
$V_{\text{заг}}\% 3$ «а»	-0,461508	0,756775	-0,268650	-0,064908	0,923935	-0,001487
$V_{\text{заг}}\% 3$ «б»	-0,634932	-0,466022	-0,512902	0,275010	0,105333	0,892557
$V_{\text{заг}}\% 4$ «а»	-0,548591	-0,478674	-0,602295	0,160748	0,069866	0,928504
$V_{\text{заг}}\% 4$ «б»	-0,608128	-0,402107	0,551481	0,903811	-0,122354	0,061605
$V_{\text{заг}}\% 4$ «в»	-0,773550	0,298268	0,058705	0,502667	0,649147	0,129322
$V_{\text{заг}}\% 4$ «г»	-0,781917	0,521887	-0,065542	0,363399	0,862796	0,107612
Доля общей дисперсии, %	44,11	19,77	15,12	30,51	26,87	21,63

Группирование 18 рек, трансграничных с Украиной, Беларусью и Казахстаном, по частичным объёмам стока, загрязнённым совокупностью химических компонентов, и оценённым по классам и разрядам

Из таблицы 9 следует, что на варьирование частичных объёмов стока в трансграничных пунктах восемнадцати рек, загрязнённых совокупностью химических компонентов, и отличающихся по уровню загрязнённости, в основном оказывает влияние фактор 1. Состав

фактора выражен через выделенные в таблице полужирным шрифтом частичные объёмы стока, второго и четвертых классов. Этот фактор составляет более 44% суммарной дисперсии. Фактор 2 составляет немного более 19% суммарной дисперсии и реализуется через долю $V_{\text{заг}}\%$ третьего класса разряда «а». Уменьшение роли фактора 1 путем вращения осей, усиливает значение $V_{\text{заг}}\%$ четвертого класса разряда «г». По численным значениям первых двух факторов было произведено группирование (рисунок 4) случаев (трансграничных пунктов рек).

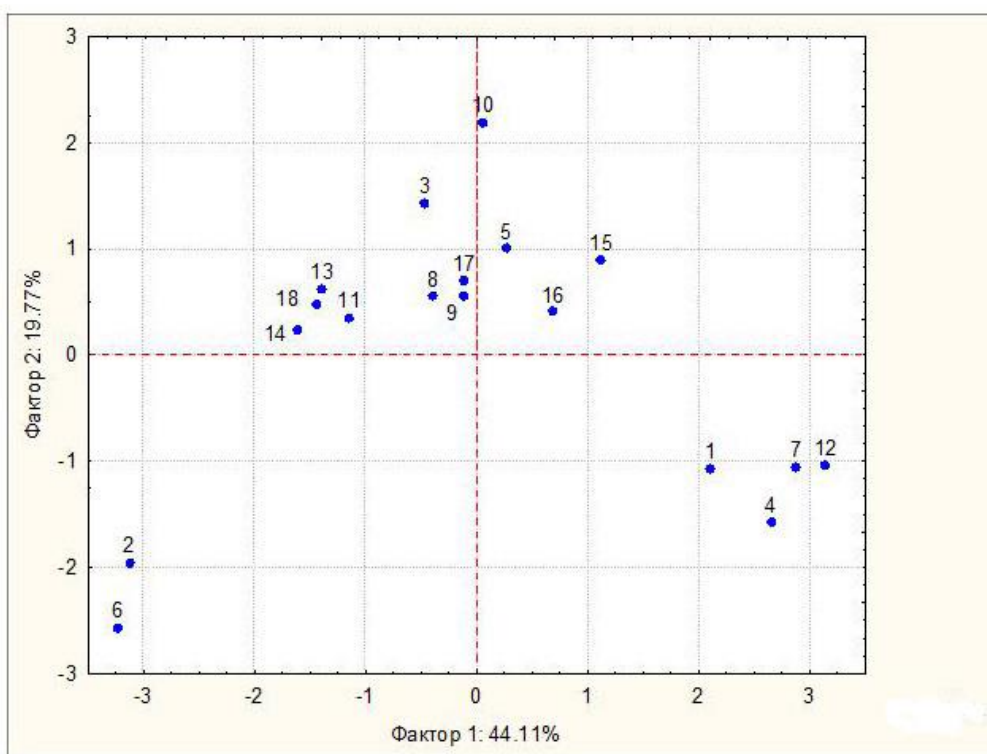


Рисунок 4. Проекция случаев (трансграничных пунктов рек) в координатах главных факторов, определяющих варьирование усреднённых за 1993-2013 гг. частичных объёмов стока, загрязнённых совокупностью химических компонентов, и оценённых по классам и разрядам, в ряду восемнадцати трансграничных рек. Индексы соответствуют рекам: 1 – Иртыш, 2 – Ипуть, 3 – Западная Двина, 4 – Северский Донец, 5 – Днепр, 6 – Десна, 7 – Тобол, 8 – Сейм, 9 – Большой Узень, 10 – Илек, 11 – Оскол, 12 – Уй, 13 – Сож, 14 – Судость, 15 – Миус, 16 – Малый Узень, 17 – Ворскла, 18 – Псёл

Figure 4. Projection of cases (transboundary river points) in the coordinates of the main factors determining the variation of the partial runoff volumes averaged for 1993-2013 contaminated with totality of hydrochemical components and estimated by classes and categories for 18 transboundary rivers. Indexes correspond to rivers: 1 – Irtysh, 2 – Iput, 3 – Zapadnaya Dvina, 4 – Seversky Donets, 5 – Dnipro, 6 – Desna, 7 – Tobol, 8 – Seim, 9 – B. Uzen, 10 – Ilek, 11 – Oskol, 12 – Uy, 13 – Sozh, 14 – Sudost, 15 – Mius, 16 – M. Uzen, 17 – Vorskla, 18 – Psel

Как видно на рисунке 4 вдоль оси фактора 1 ранжированы проекции рек по возрастанию загрязнённости стока. Проекция рек Ипуть (точка 2), Судость (точка 14), Десна (точка 6) и Псёл

(точка 18) с условно чистым стоком второго класса при продвижении по оси вправо сменяются большим количеством пунктов с загрязнённым стоком третьего класса разряда «а». Далее проецируются пункты рек Иртыш (точка 1), Северский Донец (точка 4), Тобол (точка 7) и Уй (точка 12), имеющих грязный сток четвёртого класса разрядов «а», «б» и «в». Эту закономерность нарушают проекции трех рек, которые расположены в центре облака точек с загрязнённым стоком рек третьего класса разряда «а». Это реки Сейм и Ворскла с условно чистым стоком, и река Большой Узень с очень загрязненным стоком третьего класса разряда «б». Существенно влияет на вертикальное расположение проекций рек фактор 2, возможно его влияние сказывается и в данном случае.

Таким образом, группирование рек по частичным объемам стока, загрязнённым совокупностью химических компонентов и оценённым по классам и разрядам, не связано с их водными системами. Переменные являются оценочными характеристиками стока и оба

Группы	Водная система	Реки
1	Обь→Карское море	Иртыш, Тобол, Уй
2	Урал→Каспийское море	Илек
3	Камыш-Самарские озёра	Большой Узень, Малый Узень
4	Днепр – Чёрное море	Днепр, Сож, Ворскла, Десна, Псёл, Ипуть, Сейм, Судость
5	Балтийское море	Западная Двина
6	Азовское море	Миус
7	Дон→ Азовское море	Северский Донец, Оскол

Наиболее чётко вдоль оси фактора 2 разделились реки России, трансграничные с Казахстаном. Они разделились на четыре группы по расходам воды, площади водосборов и модулю стока, что говорит о тесной связи качества стока рек с бассейновыми геосистемами.

1.2 В координатах двух главных факторов, содержание которых выражено через флуктуации $V_{\text{заг}}\%$ для единичных химических компонентов, реки водной системы Днепр – Чёрное море разделились на 5 групп, также отличающихся по величинам средних за период 1993-2013 гг. расходов стока рек, значениям модулей стока и по площадям водосборов

фактора через них могут группировать реки только по более обобщенным оценочным показателям.

Выводы

1 С помощью АПК для восемнадцати рек России, трансграничных с Беларусью, Украиной и Казахстаном были рассчитаны доли объемов стока рек ($V_{\text{заг}}\%$), загрязнённых двенадцатью единичными химическими компонентами, и усреднены за 1993-2013 гг.

1.1 Мерой сходства между сравниваемыми реками явилась корреляционная матрица, которая обрабатывалась по методу главных компонент, в результате чего была получена матрица главных факторов, выражающая состав факторов через исходные переменные.

Показано, что два главных фактора, содержание которых выражено через флуктуации $V_{\text{заг}}\%$ для единичных химических компонентов в ряду восемнадцати трансграничных рек, объединяют реки по их принадлежности к соответствующей водной системе:

Этот факт ещё раз подтверждает, что формирование долей объемов речного стока воды, имеющих сверхнормативные концентрации отдельных загрязняющих веществ, является конечным результатом круговорота вещества и энергии всей бассейновой геосистемы.

2 Для восемнадцати рек России, трансграничных с Беларусью, Украиной и Казахстаном, с помощью АПК были рассчитаны частичные объёмы стока, загрязнённые совокупностью химических веществ. Значения ($V_{\text{заг}}\%$) были также усреднены за 1993-2013 гг. и оценены по классам и разрядам в соответствии с РД 52.24.643-2002. Рассчитана также средняя многолетняя характеристики состояния

загрязнённости их стока, оценённая по классам и разрядам.

2.1 Показано, что сток рек водной системы Днепр – Чёрное море в шести трансграничных пунктах является слабо загрязненным второго класса и только в двух (реки Днепр и Сож) сток оценивается, как загрязнённый третьего класса разряда «а».

Сток рек в водной системе Иртыш - Обь – Карское море грязный и очень грязный четвертого класса разрядов «а», «б» и «в». К грязному стоку четвёртого класса разряда «а» относится река Северский Донец водной системы Дон – Азовское море. Сток рек остальных водных систем относится к загрязнённому третьего класса в основном разряда «а».

2.2 Все реки, сток которых относится ко второму, третьему классу разрядов «а» и «б», кроме рек Миус и Илек, текут из России в соседние государства. Все реки четвёртого класса разрядов «а», «б» и «в», трансграничные с Украиной и Казахстаном, несут свои грязные и

очень грязные воды из сопредельных государств в Россию.

2.3 Сток рек не однороден и содержит от трёх до восьми частичных объёмов разной степени загрязнённости, которые в свою очередь оценены по классам и разрядам.

С помощью факторного анализа показано, что главные факторы через частичные объёмы не группируют реки в соответствии с водными системами. Переменные являются оценочными характеристиками стока и главные факторы, выраженные через них, могут группировать реки только по более обобщенным оценочным показателям.

3. Таким образом, для изучения взаимосвязи величин объёмов речного стока воды, имеющих сверхнормативные концентрации загрязняющих веществ, с состоянием региональных геосистем необходимы обе характеристики качества стока, так как они дополняют друг друга.

Литература

Головина О.И. Геоэкологические проблемы поверхностных вод Курской области // Научно-исследовательские публикации. 2015. Т. 1. № 3 (23). С. 44-51.

Государственный водный кадастр: Основные гидрологические характеристики (за 1971-1975 гг. и весь период наблюдений): в 20-ти т. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан: в 3 вып. Вып. 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь / Под ред. Н.Н. Романченко. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 129 с.

Государственный водный кадастр: Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши: в 20-ти т. Т. 1. РСФСР: в 26 вып. Вып. 2. Бассейн Днепра. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 148 с.

Езерова Н.Н., Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Паводочный сток и его роль в изменении современного водного режима рек Европейской территории России // Сборник трудов конференции «Вторые Виноградовские чтения «Искусство гидрологии» (г. Санкт-Петербург,

References

Ezerova N.N., Kireeva M.B., Frolova N.L. Pavodochnyy stok i yego rol' v izmenenii sovremennogo vodnogo rezhima rek Yevropeyskoy territorii Rossii [Flood runoff and its role in changing the modern water regime of rivers in the European territory of Russia]. *Sbornik trudov konferentsii «Vtorye Vinogradovskie chteniya «Iskusstvo gidrologii» (g. Sankt-Peterburg, 18-22 noyabrya 2015) [Proceedings of the conference "The Second Vinogradov Readings" The Art of Hydrology "(St. Petersburg, November 18-22, 2015)].* St. Petersburg, Publ. of St. Petersburg State University, p. 228-231. (In Russian).

Frolova N.L., Kireeva M.B., Dzhamalov R.G., Retz E.P, Telegina E.A. Izmeneniya vodnogo rezhima i sezonnogo stoka rek ETR i ikh vliyanie na ekstremal'nye gidrologicheskie situatsii [Water regime and seasonal flow changes and their impact on the extreme hydrological events]. *Sbornik trudov chetvertoi vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov» (g. Moskva, 15-18 sentyabrya 2015) [Proceedings of Fourth*

18-22 ноября 2015 г.). СПб: СПбГУ, 2018. С. 228-231.

Иберла К. Факторный анализ / Пер. с нем. В.М. Ивановой. М.: Статистика, 1980. 398 с.

Караушев А.В., Скакальский Б.Г. Актуальные проблемы исследования качества поверхностных вод // Метеорология и гидрология. 1973. № 10. С. 73-81.

Караушев А.В., Скакальский Б.Г. Проблемы мониторинга качества поверхностных вод суши // Проблемы современной гидрологии: сборник статей. Л.: Гидрометеоздат, 1979. С. 94-105.

Корнилов А.Г., Колмыков С.Н., Кичигин Е.В. Гордеев Л.Ю. Сравнительная характеристика воздействия горнодобывающих предприятий КМА на экологическую ситуацию рек Белгородской области // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. №6. С. 134-139.

Лобода Н.С., Пилипюк В.В. Оценка экологического состояния рек Псёл и Ворскла по уровню использования вод в трансграничной зоне «Россия – Украина» // Вестник Одесского государственного экологического университета. 2012. Вып.14. С. 151-159.

Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под ред. А.В. Караушева. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 288 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность: в 20 т. Т. 7. Донской район. Бассейн р. Дона без бассейна р. Север. Донца / под ред. Д.Д. Мордухай-Болтовского. Л.: Гидрометеоздат, 1964. 267 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность: в 20 т. Т. 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан: в 2 вып. Вып. 2. Урало-Эмбинский район / под ред. З.Г. Марковой. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 152 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики: в 20 т. Том 6. Украина и Молдавия: в 4 вып. Вып. 3. Бассейн

Russian Scientific Conference «Fundamental Problems of Water and Water resources» (Moscow, September 15-18, 2015)]. Moscow, Publ. IVP RAN, 2015, pp. 345-348. (In Russian; abstract in English).

Golovina O.I. Geoekologicheskie problemy poverkhnostnykh vod Kurskoi oblasti [Geoenvironmental problems of surface water Kursk region]. Nauchno-Issledovatel'skie Publikatsii [Journal of Scientific Research Publications], 2015, vol. 1. no. 3 (23), pp. 44-50. (In Russian, abstract in English).

Gosudarstvennyi vodnyi kadastr: Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki (za 1971-1975 gg. i ves' period nablyudenii): v 20-ti tomakh. Tom 15. Altai, Zapadnaya Sibir' i Severnyi Kazakhstan: v 3 vypuskakh. Vypusk 3. Nizhnii Irtysh i Nizhnyaya Ob' [State Water Cadastre: Basic hydrological characteristics (for 1971-1975 and the entire observation period): in 20 volumes. Volume 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan: in 3 issues. Issue 3. Lower Irtysh and Lower Ob']. Ed. N.N. Romanchenko. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1978. 129 p. (In Russian).

Gosudarstvennyi vodnyi kadastr: Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sush: v 20-ti tomakh. Tom 1. RSFSR: v 26 vypuskakh. Vypusk 2. Bassein Dnepra [State Water Cadastre: Long-term data on the regime and resources of land surface waters: in 20 volumes. Volume 1. RSFSR: in 26 issues. Issue 2. Dnieper basin]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1984. 148 s. (In Russian).

Karaushev A.V., Skakal'skii B.G. Aktual'nye problemy issledovaniya kachestva poverkhnostnykh vod [Actual problems of surface water quality research]. Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and hydrology], 1973, no. 10, pp. 73-81. (In Russian).

Karaushev A.V., Skakal'skii B.G. Problemy monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod sush: [Problems of monitoring land surface water quality]. Problemy sovremennoi gidrologii: sbornik statei [Problems of Modern Hydrology: collection of Articles]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979, pp. 94-105. (In Russian).

р. Северского Донца и реки Приазовья. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 543 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность: в 20 т. Т. 11. Средний Урал и Приуралье: в 2 вып. Вып. 2. Тобол. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 280 с.

Румянцева Э.А., Бобровицкая Н.Н. Методика интегральной оценки многолетних изменений качества речного стока на примере р. Ворскла // *Метеорология и гидрология.* 2012. №5. С. 85-95.

Румянцева Э.А., Бобровицкая Н.Н., Ильин Е.В. Новый подход к автоматизированному расчёту частичных объёмов речного стока разной степени загрязнения (на примере р. Селенга) // *Метеорология и гидрология.* 2014. №6. С. 51-60.

Румянцева Э.А., Бобровицкая Н.Н., Сухоногова Е.С. Единая оценка количества и качества водного стока реки Сейм с помощью новой автоматизированной технологии // *Гидросфера. Опасные процессы и явления.* 2020. Т. 2. Вып. 1. С. 53-70. DOI: [10.34753/HS.2020.2.1.53](https://doi.org/10.34753/HS.2020.2.1.53)

Скакальский Б.Г. Оценка качества речных вод // *Методы расчёта речного стока: Международные высшие гидрологические курсы ЮНЕСКО при МГУ: в 2 частях. Часть 1.* М.: изд. МГУ (МКГК ЮНЕСКО), 1980. С. 98-112.

Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Джамалов Р.Г., Рец Е.П., Телегина Е.А. Изменения водного режима и сезонного стока рек ЕТР и их влияние на экстремальные гидрологические ситуации // *Сборник трудов IV всероссийской научной конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов»* (г. Москва, 15-18 сентября 2015 года). М.: ИВП РАН, 2015. С. 345-348.

Kornilov A.G., Kolmykov S.N., Kichigin E.V., Gordeev L.J. Sravnitel'naya kharakteristika vozdeystviya gornodobyvayushchikh predpriyatii KMA na ekologicheskuyu situatsiyu rek Belgorodskoy oblasti [Comparative analysis of Kursk magnetic anomaly mining enterprises impact on ecological situation of rivers of Belgorod region]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' [Mining informational and analytical bulletin]*, 2010, no. 6, p.134-139. (In Russian).

Karaushev A.V. (ed.). Metodicheskie osnovy otsenki i reglamentirovaniya antropogennogo vliyaniya na kachestvo poverkhnostnykh vod [Methodological foundations for assessing and regulating the anthropogenic impact on surface water quality]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987. 288 p. (In Russian).

Loboda N.S., Pilipyuk V.V. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya rek Psel i Vorskla po urovnyu ispol'zovaniya vod v transgranichnoi zone «Rossiya – Ukraina» [Estimation of the ecological state of the rivers of Psel and Vorskla on level of the use in transformat area “Russia - Ukraine”]. *Vestnik Odesskogo gosudarstvennogo ekologicheskogo universiteta [Bulletin of Odessa State Environmental University]*, 2012, iss. 14, pp. 151-159. (In Russian; abstract in English)

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost': v 20 vol. Vol 7. Donskoi raion. Bassein r. Dona bez basseina r. Sever. Dontsa. [Surface water resources of the USSR. Hydrological study: in 20 volumes. Volume 7. Don region. River basin Don without a pool r. North. Donets]. Mordukhai-Boltovskii D.D. (ed.). Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1964. 267 p. (In Russian).

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost': v 20 vol. Vol 12. Nizhnee Povolzh'e i Zapadnyi Kazakhstan: v 2 vyp. Vyp. 2. Uralo-Embinskii raion. [Surface water resources of the USSR. Hydrological study: in 20 volumes. Volume 12. Lower Volga region and Western Kazakhstan: in 2 issues. Issue 2. Ural-Emba region]. Markova Z.G. (ed.). Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1966. 152 p. (In Russian).

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki: v 20 vol. Vol. 6. Ukraina i Moldaviya: v 4 vyp. Vyp. 3. Bassein r. Severskogo Dontsa i reki Priazov'ya [Surface water resources of the USSR. Main hydrological characteristics: in 20 volumes. Volume 6. Ukraine and Moldova: in 4 issues. Issue 3. The pool r. Seversky Donets and the Azov River]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1975. 543 p. (In Russian).

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost': v 20 vol. Vol. 11. Srednii Ural i Priural'e: v 2 vyp. Vyp. 2. Tobol. [Surface water resources of the USSR. Hydrological study: in 20 volumes. Volume 11. Middle Urals and Urals: in 2 issues. Issue 2. Tobol]. Markova Z.G. (ed.). Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1980. 280 p. (In Russian).

Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N. Technique of integral assessment of long-term variations of streamflow quality by the example of the Vorskla River. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, vol. 37, no. 5, pp. 346-353.

DOI: [10.3103/S1068373912050081](https://doi.org/10.3103/S1068373912050081) (Russ. ed.: Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N. Metodika integral'noi otsenki mnogoletnikh izmenenii kachestva rechnogo stoka na primere reki Vorskla. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2012, no. 5, pp. 85-95).

Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N., Il'in E.V. A new approach to the automatic computation of partial volumes of river runoff with various degrees of pollution (a case study for the Selenga River). *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, vol. 39, no. 6, pp. 395-401.

DOI: [10.3103/S1068373914060053](https://doi.org/10.3103/S1068373914060053) (Russ. ed.: Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N., Il'in E.V. Novyi podkhod k avtomatizirovannomu raschetu chastichnykh ob'emov rechnogo stoka raznoi stepeni zagryazneniya (na primere r. Selenga). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, no. 6, pp. 51-60).

Rumyantseva E.A., Bobrovitskaya N.N., Sukhonogova E.S. Edinaya otsenka kolichestva i kachestva vodnogo stoka reki Seim s pomoshch'yu novoi avtomatizirovannoi tekhnologii [A unified assessment of the quantity and quality of the Seim river water flow using new automated technology]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya*

[*Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*], 2020, vol. 2, iss. 1, pp. 53-70. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.34753/HS.2020.2.1.53](https://doi.org/10.34753/HS.2020.2.1.53)

Skakal'skii B.G. Otsenka kachestva rechnykh vod [River water quality assessment]. *Metody rascheta rechnogo stoka: Mezhdunarodnye vysshie gidrologicheskie kursy YuNESKO pri MGU: v 2 chastyakh. Chast' 1.* [Methods for calculating river flow: UNESCO International Higher Hydrological Courses at Moscow State University: in 2 parts. Part 1.]. Moscow, MGU Publ. (MKGK YuNESKO), 1980, pp. 98-112. (In Russian).

Überla K. *Faktorenanalyse*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977. 400 p. (Russ. ed.: Überla K. *Faktornyi analiz*. Moscow, Statistika Publ., 1980. 398 p.)