

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА  
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ  
(НА ПРИМЕРЕ РЕК СЕВЕРА РУССКОЙ РАВНИНЫ)**

**Федорова В.А., Низамиева Г.Р.**

*ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия*

В работе проведен анализ качественного состава речных вод севера Русской равнины методом главных компонент, выявлены и интерпретированы основные факторы, формирующие многолетнюю изменчивость химического состава воды, и вносящие различный вклад в суммарную дисперсию.

По гидролого-гидрохимическим материалам за период 1995–2007 гг. на 20 постах, расположенных на реках севера Русской равнины, определены ведущие факторы: литогенные особенности водосборов (на них приходится 17–51% всей дисперсии выборки), жизнедеятельность растительных и животных организмов (12–39%), выщелачивание Fe- и Cu-содержащих горных минералов (10–29%). В статье показано, что при формировании химического состава воды рек исследуемого региона определяющим является фактор поступления ионов из пород, на которых происходит формирование водосбора. Выявлен фактор, характеризующий местные условия формирования речного стока – процесс разгрузки подземных вод, проявляющийся в изменении концентраций кремния и нитратов. Кроме того, установлена отрицательная зависимость изменений содержания ионов кремния и нитратов от температуры.

Ключевые слова: метод главных компонент, факторы формирования химического состава поверхностных вод, реки севера Русской равнины.

**DETERMINATION OF FORMING FACTORS SURFACE WATER CHEMISTRY BY  
PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS  
(AN EXAMPLE OF RIVERS OF THE NORTH RUSSIAN PLAIN)**

**Fedorova V.A., Nizamieva G.R.**

*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia*

The paper analyzes the quality of the river waters of the northern Russian Plain by principal component, identified and interpreted the main factors shaping long-term variability in water chemistry and introduce a different contribution to the total variance. For hydrological and hydrochemical materials for the period 1995 - 2007 years on the 20 posts, located on the rivers of the northern Russian Plain, identified major factors: lithogenic characteristics of watersheds (accounting for 17-51% of the variance of the sample), the vital activity of plants and animals (12-39%), leaching of Fe-and Cu-containing rock minerals (10-29%). The article shows that the chemical composition of water in rivers of the region is the determining factor in admission of ions from the rock on which the reservoir is formed. The factors characterizing the local conditions for the formation of river runoff - the process of groundwater discharge, manifested by changes in the concentrations of silicon and nitrogen. In addition, the established negative correlation changes the content of silicon and nitrate ions on the temperature.

Keywords: the method of principal components, factors of the chemical composition of surface water, river north of the Russian Plain.

**Введение.** В настоящее время в процессе формирования химического состава вод становится довольно значимым антропогенный фактор, который выступает наряду с природными геохимическими и биологическими процессами. В связи с этим на современном этапе актуальным является комплексный анализ многолетней изменчивости гидролого-гидрохимических показателей поверхностных и подземных вод. Комплексную оценку факторов формирования химического состава природных вод можно осуществить при

помощи метода главных компонент, который достаточно широко применяется для обработки гидрохимических и гидрофизических массивов данных.

**Целью** данной работы является выделение и интерпретация факторов, формирующих многолетнюю изменчивость химического состава воды рек севера Русской равнины.

Многообразие факторов, определяющих формирование химического состава природных вод, позволяет выделить среди них прямые и косвенные, а также главные и второстепенные. Прямыми называются факторы, непосредственно влияющие на состав воды (почвы, горные породы), к косвенным относятся факторы, действующие опосредованно. Главные факторы определяют состав вод, т.е. способствуют формированию вод конкретного гидрохимического типа (хлоридного, сульфатного и т.д.). Второстепенные же факторы способствуют появлению в воде компонентов, придающих конкретному типу воды некоторые особенности.

По характеру воздействия факторы, определяющие формирование химического состава природных вод, подразделяются на:

- физико-географические (рельеф, климат, выветривание, почвенный покров);
- геологические (состав горных пород, тектоническое строение, гидрогеологические условия);
- физико-химические (химические свойства элементов, кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия, смешение вод и катионный обмен);
- биологические (деятельность растений и живых организмов);
- искусственные или антропогенные (факторы, связанные с деятельностью человека) [3; 5].

**Материалы и методы исследования.** Для выявления основных факторов формирования химического состава поверхностных вод севера Русской равнины были выбраны 20 гидролого-гидрохимических постов, расположенных на реках исследуемой территории. В качестве исходной информации мы принимали: концентрации главных ионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ), соединений азота ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), общего фосфора, фосфатов, металлов (Si, Cu, Fe, Zn), минерализацию, pH, прозрачность, температуру, количество взвешенных веществ и кислорода, расход воды в день взятия пробы за период 1995–2007 гг.

В ходе работы был проведен факторный анализ, реализуемый при помощи метода главных компонент. Для лучшей интерпретации полученных факторов данный метод применялся для всей совокупности гидрохимических данных на протяжении трех гидрологических сезонов (зимней межени, весеннего половодья и летне-осеннего периода), а также для каждого створа индивидуально в течение всего гидрологического года.

Факторы объединяют в одну группу коррелируемые между собой переменные, и, если они поддаются интерпретации, это означает, что они могут быть прямо или косвенно связаны с некоторым определенным источником поступления химических веществ в водоток или процессом, их объединяющим. Для лучшей интерпретации факторов производится их вращение [1]. В данной работе применено варимаксное вращение факторов, которое минимизирует число переменных с высокими значениями нагрузок. В результате расчетов были получены матрицы главных факторов.

Факторный анализ достаточно широко применяется в гидрологии, гидрохимии и других отраслях науки. В частности, метод главных компонент использовался для исследования многолетней изменчивости качества воды рек Селенга и Киран на границе России и Монголии [4], а также при изучении влияния техногенных факторов на состав поверхностных вод в районах нефтедобычи Западной Сибири [2].

**Результаты исследования.** Многолетняя изменчивость качества воды рек севера Русской равнины обусловлена рядом факторов, которые вносят различный вклад в суммарную дисперсию.

При анализе процесса формирования химического состава воды рек на протяжении периода зимней межени выделено 3 основных фактора, на долю которых приходится 52,2% дисперсии выборки (табл. 1). Первый фактор объединяет биогенные элементы (соединения азота и фосфора), его можно интерпретировать как жизнедеятельность растительных и животных организмов. Известно, что в ходе процесса продуцирования органических веществ живые организмы активно поглощают азот нитратный и фосфор, растворенные в речных водах. Некоторые же соединения, такие как азот аммонийный, поступают в водоток в процессе отмирания живых организмов, а также распада продуктов их жизнедеятельности.

Таким образом, концентрации биогенных элементов и их режим зависят от интенсивности биогеохимических и биологических процессов, происходящих в водотоке. В зимний период происходит распад накопившегося органического вещества (что влечет увеличение аммонийного азота) и отмечается минимальное потребление нитратного азота растительностью.

Анализ временной изменчивости концентраций биогенных компонентов показывает, что значения изменяются во времени синхронно, свидетельствуя о наличии фактора, одновременно влияющего на указанные показатели.

Второй по силе воздействия фактор, действующий в зимний период, объединяет главные «литогенные» ионы (гидрокарбонаты, сульфаты, ионы кальция, магния и минерализацию). Данный фактор относится к группе геологических и характеризует поступление ионов в процессе растворения горных пород, на которых происходит

формирование водосбора. Синхронность многолетних изменений концентраций главных «литогенных» ионов свидетельствует о единственном факторе, в качестве которого выступает литогенная основа и поступление компонентов в процессе ее растворения.

**Таблица 1 – Матрица главных факторов в период зимней межени\***

Переменные	Факторы		
	1	2	3
pH			
Ca <sup>2+</sup>		0,95	
Mg <sup>2+</sup>		0,90	
Na <sup>+</sup>			
K <sup>+</sup>			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,80	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		0,87	
Cl <sup>-</sup>			
Минерализация		0,96	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,79		
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,77		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,75		
Фосфор общий	0,90		
Фосфаты	0,92		
O <sub>2</sub>			
Cu <sup>2+</sup>			0,81
Fe <sup>2+</sup>			
Кремний			
Температура			
Прозрачность			
Расход			
Взвешенные вещества			
Вклад факторов (%)	30,9	15,6	5,7

\* В таблице указаны значения факторных весов переменных более 0,7.

Третий фактор определяет изменчивость содержания меди, он аналогичен предыдущему и относится к группе геологических, характеризую процессы химического выветривания и растворения Cu-содержащих пород.

При анализе химического состава воды рек в период весеннего половодья выделено 3 фактора, на долю которых приходится 48,6% дисперсии выборки (табл. 2). При этом главным фактором, составляющим 31,2% дисперсии всех показателей, становится влияние литогенной основы на поступление ионов в речные воды.

**Таблица 2 – Матрица главных факторов в период весеннего половодья\***

Переменные	Факторы		
	1	2	3
pH			
Ca	0,95		
Mg	0,93		
Na			
K			
HCO <sub>3</sub>	0,92		
SO <sub>4</sub>	0,77		
Cl			
Минерализация	0,97		
NH <sub>4</sub>		0,64	
NO <sub>2</sub>			
NO <sub>3</sub>			
Фосфор общий		0,72	
Фосфаты		0,69	
O <sub>2</sub>			
Cu			
Fe			-0,92
Кремний			
Температура			
Прозрачность			
Расход			
Взвешенные вещества			
Вклад факторов (%)	31,2	12,1	5,3

\* В таблице указаны значения факторных весов переменных более 0,7.

Это связано с тем, что весной происходит значительное увеличение жидкого стока рек за счет таяния снега и больших объемов поверхностного стока, что приводит к более интенсивному вымыванию элементов из горных пород и минералов.

Кроме того, именно в период весеннего половодья проявляется обратная зависимость концентраций «литогенных» ионов от значений расходов воды, что объясняется увеличением водности, приводящим к разбавлению и, соответственно, уменьшению концентраций ионов.

Фактор, отражающий интенсивность жизнедеятельности растительных и животных организмов, в весенний сезон становится вторым по значимости (12,1%). Следует отметить, что в весенний и летне-осенний периоды в данном факторе не проявляются нитраты и нитриты, которые являются питательными веществами для растительных организмов, извлекающих их из воды. Поэтому в вегетационный период (период усиленного развития водорослей) количество нитратов в открытых водоемах резко уменьшается и может достигать до аналитического нуля.

Третий фактор в период весеннего половодья характеризует процессы химического выветривания и растворения Fe-содержащих минералов. Основным источником соединений железа в поверхностных водах являются процессы выветривания горных пород, далее железобактерии окисляют двухвалентное железо до трёхвалентного и используют освобождающуюся при этом энергию на усвоение углерода из углекислого газа или карбонатов.

При анализе химического состава воды в летне-осенний период было выделено 3 основных фактора, на долю которых приходится 60,3% дисперсии выборки. При этом ведущим фактором выступает деятельность растительных и животных организмов, что объясняется высокой интенсивностью биологических и биохимических процессов (снижаются концентрации нитратного азота, который активно потребляется биотой), на втором месте – литогенный фактор. Третий фактор – физический, заключается в изменении температуры речной воды. В период летней межени наблюдается существенное увеличение температуры воздуха, что приводит к нагреванию поверхностных вод, в результате создаются благоприятные условия для биохимических процессов (развитие растительности и микроорганизмов), протекающих с участием кислорода. Именно поэтому проявляется отрицательная зависимость изменений количества кислорода с изменением температуры.

Анализ данных химического состава речных вод индивидуально по каждому посту в течение всего гидрологического года позволил выявить дополнительно регионально

значимые факторы. Один из таких факторов объединяет поступление кремния и нитратов в поверхностные воды, причем фиксируется обратная связь концентраций указанных компонентов с температурой. Очевидно, данный фактор характеризует гидрогеологические условия, а именно разгрузку подземных вод. Наличие нитратов свидетельствует о подземном питании рек, поскольку в подземных водах содержание нитратов выше по сравнению с поверхностными, что объясняется отсутствием их основных потребителей – растений. По температурному режиму подземные воды относятся к категории холодных, поэтому проявляется отрицательная зависимость изменений концентраций ионов кремния, нитратов и температуры.

### **Заключение**

На основании гидролого-гидрохимических материалов за период 1995–2007 гг. в течение основных гидрологических сезонов (зимняя межень, весеннее половодье и летне-осенний период) на 20 постах, расположенных на реках севера Русской равнины, определены ведущие факторы формирования химического состава воды: литогенные особенности водосборов (на них приходится 17–51% всей дисперсии выборки), жизнедеятельность растительных и животных организмов (12–39%), выщелачивание Fe- и Cu-содержащих горных минералов (10–29%). Таким образом, показано, что в формировании качественного состава воды рек исследуемого региона определяющим является фактор поступления ионов из пород, на которых происходит формирование водосбора.

В процессе индивидуального анализа каждого створа в течение всего гидрологического года, наряду с указанными выше, были выявлены факторы, характеризующие местные условия формирования речного стока. А именно: выделен фактор, отражающий процесс разгрузки подземных вод, проявляющийся в изменении концентраций кремния и нитратов.

Таким образом, изучение механизмов формирования качества речных вод с помощью метода главных компонент является достаточно перспективным направлением, которое может быть рекомендовано для проведения аналогичных исследований в других регионах.

### **Список литературы**

1. Иберла К. Факторный анализ / пер. с нем. В.М. Ивановой. – М. : Статистика, 1980. – 398 с.
2. Москвиченко Д.В. Влияние техногенных факторов на состав поверхностных вод в районах нефтедобычи Западной Сибири // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. – 2006. – № 6. – С. 154–163.
3. Никаноров А.М. Гидрохимия : учебник. – СПб. : Гидрометеиздат, 2001. – 444 с.

4. Румянцева Э.А., Бобровицкая Н.Н. Многолетняя изменчивость качества воды рек Селенга и Киран на границе России и Монголии // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37. – № 3. – С. 329-340.
5. Цыцарин Г.В. Введение в гидрохимию : учеб. пособ. для студентов-гидрологов. – М. : Изд-во Моск.ун-та, 1988. – 104 с.

#### **Рецензенты**

Сироткин Вячеслав Владимирович, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой географии и картографии Института экологии и географии Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань.

Рубцов Владимир Анатольевич, доктор географических наук, профессор Института экологии и географии Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань.