

## МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РЕЧНОМ ВЗВЕШЕННОМ ВЕЩЕСТВЕ (Р. ОКА, 1983–2018 ГГ.)

В.Н. Орешкин, В.Р. Хрисанов\*

Рассмотрены особенности распространённости кадмия, свинца, частично Ag, Bi, In, Hg, Tl в составе взвешенного вещества р. Ока в районе Приокско-Тerrasного природного биосферного заповедника (ПТЗ), в период 1983–2018 гг. на участке реки, удалённом от зоны формирования техногенного потока рассеяния. Для оценки общей направленности изменения концентрации элементов за период проведения эксперимента предложено рассматривать результаты о их распространённости в составе взвешенного вещества, полученного в промежуточной гидрологической фазе реки между весенним половодьем и летней меженью. В этом заключаются особенности и суть предлагаемого подхода с целью исключить влияние значительных сезонных изменений макро- и микрокомпонентного состава взвесей. Показано, что 35-летний временной интервал можно разделить на два периода: первый характеризуется уменьшением концентрации тяжёлых металлов (Cd, Pb), второй – отсутствием какого-либо тренда, относительно слабыми флуктуациями значений. Направленность изменения концентрации элементов в первый период коррелирует с литературными данными о динамике уменьшения поступления антропогенных стоков в поверхностные воды в последние десятилетия и с результатами оценки снижения загрязнённости речной воды выше по течению реки от района проведения эксперимента.

**Ключевые слова:** взвешенное вещество речных вод<sup>1</sup>, тяжёлые металлы, антропогенное загрязнение.

**Ссылка для цитирования:** Орешкин В.Н., Хрисанов В.Р. Многолетняя динамика концентрации тяжёлых металлов в речном взвешенном веществе (р. Ока, 1983–2018 гг.) // Жизнь Земли. 2025. Т. 47, № 4. С. 527–538. DOI: 10.29003/m4986.0514-7468.2025\_47\_4/527-538.

Поступила 09.11.2025 / Принята к публикации 26.11.2025

## LONG-TERM DYNAMICS OF HEAVY METAL CONCENTRATIONS IN RIVER SUSPENDED MATTER (OKA RIVER, 1983–2018)

V.N. Oreshkin, PhD, V.R. Khrisanov, PhD

*Institute of Basic Problems of Biology RAS, Pushchino, Moscow Region*

*Distribution features of cadmium, lead, partly Ag, Bi, In, Hg and Tl in suspended solids are considered. Studies were made on the Oka River in the area of the Prioksko-Terrasny Natural Biosphere Reserve on a river section remote from the zone of formation of the technogenic scattering stream, in the period 1983–2018. To assess the general trend of changes in the concentration of the elements over the period of the experiment, it was proposed to consider the results on their prevalence in the composition of suspended matter obtained in*

\* Орешкин Валентин Николаевич – к.г.н., в.н.с., ORCID: 0000-0002-6674-6847; Хрисанов Владислав Радомирович – к.г.н., с.н.с., hvr14@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9503-5289; Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пушкино Московской области.

<sup>1</sup> Твёрдые частицы различного происхождения (литогенные, биогенные и др.), переносимые реками. В практике геолого-геохимических и экологических исследований чаще всего выделяют фильтрацией образцов воды через мембранные или ядерные фильтры с размером пор 0,2–0,7 мкм [3].

*the intermediate hydrological phase of the river between the spring flood and the summer madden. This is the main feature and essence of our proposed approach in order to eliminate the influence of significant seasonal changes in the macro- and micro-component composition of suspensions. It is shown that the 35-year time interval can be divided into two periods, namely: the first one is characterized by a decrease in the concentration of heavy metals (Cd, Pb), while the second one is characterized by the absence of any trend, relatively weak fluctuations in values. The direction of changes in the concentration of elements in the first period correlates with the literature data on the dynamics of a decrease in the intake of anthropogenic wastewater into surface waters in recent decades and with the results of our assessment of the decrease in river water pollution upstream from the experimental area.*

**Keywords:** suspended matter of river waters, heavy metals, anthropogenic pollution.

**For citation:** Oreshkin, V.N., Khrisanov, V.R., "Long-term dynamics of metal concentrations in river suspended matter (Oka River, 1983–2018)", *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* 47, no 4, 527–538 (2025). DOI: 10.29003/m4986.0514-7468.2025\_47\_4/527-538.

**Введение.** Первые обобщения химического состава речного взвешенного вещества, оценка средних концентраций редких и рассеянных элементов (Ag, Cd, Pb и др.), соотношений взвешенной и растворённой форм их миграции были сделаны уже в 70–80-е гг. XX века [3, 22]. Малый поначалу объём информации постепенно пополнялся и включал доказательные результаты интегрального влияния загрязнённых стоков различного происхождения (промышленных, коммунально-бытовых, сельскохозяйственных, поверхностно-ливневых с урбанизированных территорий) на концентрирование тяжёлых металлов в речных взвесах, в этих, как оказалось, важных природных образованиях ландшафтной оболочки Земли.

Можно особо выделить последние два десятилетия, отмеченные всплеском интереса к изучению роли взвешенной формы миграции элементов, в частности, в крупных реках Русской равнины (Волга, Северная Двина, Ока) и других регионов с разным уровнем антропогенного воздействия, что необходимо для решения современных актуальных геолого-геохимических и экологических задач [2, 5, 9, 17–21, 23, 25–28, 31]. Развитию исследований способствовали успехи в разработке высокочувствительных методов определения следовых количеств элементов в образцах взвесей сложного органоминерального состава. В этот период были расширены знания о распространённости не только токсичных тяжёлых металлов (Cd, Pb, Hg), но и малоизученных до сих пор (Ag, Bi, In, Tl и др.). Известны результаты обобщений данных о распространённости тяжёлых металлов во взвесах рек мира и отдельных регионов [3, 4, 12, 19, 20, 31]. Некоторые данные содержатся в **табл.** Так, во взвеси рек в районах с высоким антропогенным влиянием среднее содержание Cd и Pb в 3–6 раза выше, чем во взвеси «фоновых» районов с незначительным антропогенным воздействием, т. е. происходит процесс формирования антропогенных геохимических аномалий регионального масштаба [19, 20]. В работе [12] отмечено увеличение средней концентрации Pb в образцах взвеси участков равнинных рек (Волга, Днепр, Дунай), отобранных в 1976 г., в два раза по сравнению с данными для образцов, полученных в 1954–1955 гг. [8]. Интересны результаты определения Cd во взвеси участков устьевой зоны р. Сев. Двина. В работе [26] анализировали взвеси, отобранные в период 2004–06 гг. во время весеннего половодья, в 1997 г. и 2006 г. – в летнюю межень. Позднее, в другой работе [5], Cd определяли во взвеси той же устьевой зоны реки, отбираемой ежемесячно в период 2015–19 гг. в разные сезоны. Результаты этих работ можно сравнить с данными анализа взвеси устьевой зоны р. Сев. Двина, полученной в начале июня в 1969 г. [13]. Как оказалось, содержание Cd (0,27–1,9 мкг/г) вполне сопоставимо с результатами определений в образцах 2004–06 гг. (0,32–1,93 мкг/г) и 1997, 2006 гг. (0,47–0,90 мкг/г), а также с данными определений 2015–2019 гг. (0,46–0,93 мкг/г).

**Таблица.** Средние концентрации Cd и Pb в речном взвешенном веществе в реках с различной степенью антропогенного влияния, мкг/г, ppm

**Table.** Average Cd and Pb concentrations in river suspended matter in several rivers with varying degrees of anthropogenic influence, µg/g, ppm

Элементы	Незначительное антропогенное влияние		Значительное антропогенное влияние		Техногенная взвесь, бассейн типичной равнинной реки* [22]	Верхняя часть континентальной коры [1]
	реки мира [20]	горные реки [12]	реки мира [20]	равнинные реки [12]		
Cd	0,5	0,54	2,7	1,7	35,67**; 71,25***	0,3
Pb	25	53	95	200	516,67; 952,86	17

*Примечание:* \*в зоне смешения речных и сточных вод (верхний и нижний участок); \*\*нижний участок зоны смешения; \*\*\*верхний участок зоны смешения.

Следовательно, фактический материал показывает отсутствие тенденций к увеличению или уменьшению содержания Cd во взвеси р. Сев. Двина, подверженной слабому антропогенному воздействию за длительный период исследований (1969–2019 гг.).

Соответственно, постоянно с 1983 г. [12, 15] возникал вопрос о проведении длительного эксперимента по слежению за концентрацией Cd, Pb и других элементов во взвеси крупной равнинной реки Центральной России, например, р. Ока, характеризующейся, в отличие от Сев. Двины, большим антропогенным воздействием на участках урбанизированных территорий верхнего, среднего и нижнего течения [7, 24]. Авторы к настоящему времени располагают результатами определения элементов (Cd, Pb, частично Ag, Bi, Hg, Tl, In) в коллекционных образцах взвеси р. Ока, отобранных в период 1983–2018 гг. на участке реки в районе ПТЗ [15]. Выше по течению (~12–18 км) находится ближайшая зона формирования техногенного потока рассеяния (г. Серпухов и его окрестности) с высокими концентрациями Cd и Pb в донных осадках, а также растворённых форм элементов в воде на участках р. Ока и её притоков (Нара, Речма), значительно превышающими фоновые значения [29]. В цитируемой работе взвеси не анализировали.

При постановке эксперимента неизбежно возник непростой вопрос о выборе времени отбора образцов. Чаще всего, можно сказать, традиционно, образцы воды и взвеси отбирают в периоды весеннего половодья и летней или летне-осенней межени. Однако именно в эти периоды происходят существенные изменения макро- и микроэлементного состава взвеси [2, 5, 8, 26]. В весеннее половодье взвеси обогащаются литогенными компонентами и тяготеющими к ним элементами, а в летнюю межень – биогенными компонентами, значительно влияющими на концентрирование тяжёлых металлов, в частности, Cd и Pb. В работе был сделан выбор времени отбора образцов в «нетрадиционной» гидрологической фазе реки, промежуточной между весенним половодьем и летней меженью при стабилизации уровня воды, уменьшении мутности, но до начала резкого увеличения интенсивности биогенных процессов. Такой подход, по мнению авторов, может обеспечить получение результатов, правильнее отражающих общую динамику изменений концентраций элементов во времени, поскольку будут исключены сезонные флуктуации состава взвесей в весеннее половодье и летне-осеннюю межень.

Цель данной работы заключается в сравнительной характеристике распространённости Cd, Pb и других элементов во взвешенном веществе р. Ока, и на этой базе развитии подходов к оценке направленности изменения концентраций за период проведения эксперимента.

**Экспериментальная часть работы.** Образцы воды отбирали ежегодно (за исключением 1989 и 1998 гг.) в промежуточный период между весенним половодьем

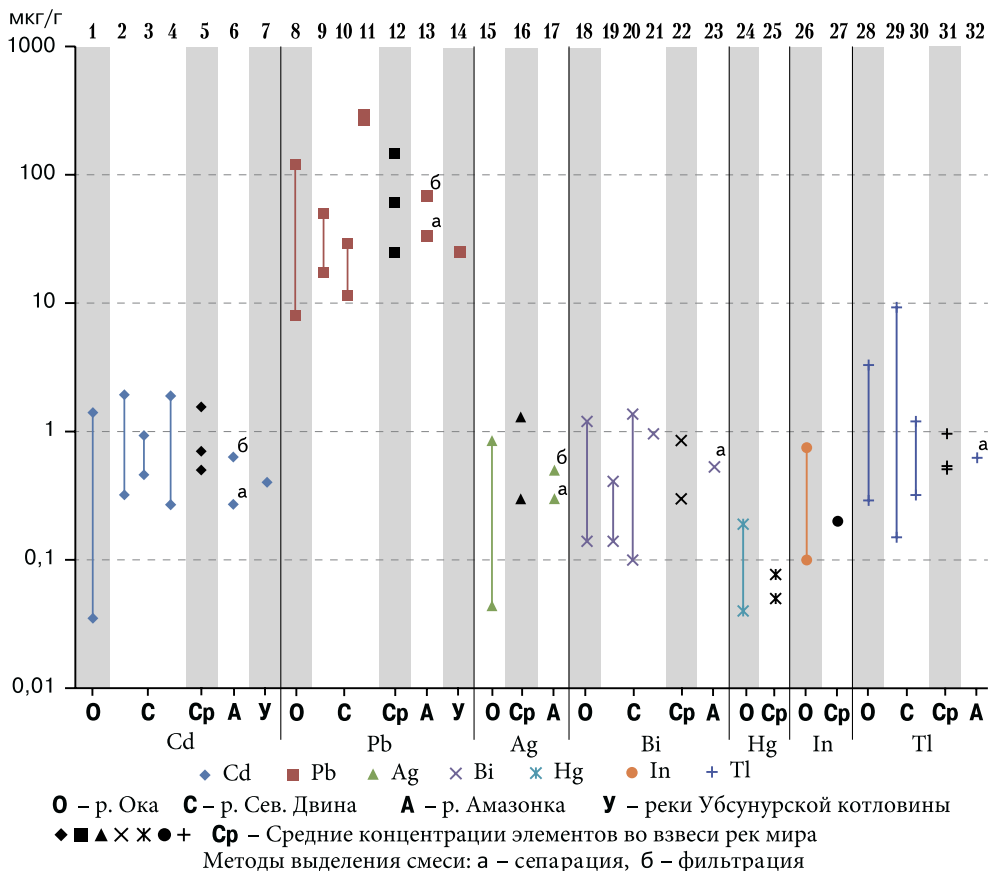
и летней меженью, вдали от берега, гор, на глубине до 0,5 м [15]. Этот эксперимент был дополнен отбором образцов в летнюю и осеннюю межень 2008 и 2013 гг. для характеристики сезонной изменчивости концентраций элементов. Взвеси выделяли методом мембранной ультрафильтрации (фильтры с диаметром пор 0,7 и 0,45 мкм), процедура соответствовала принятой в геолого-геохимических исследованиях [3, 4, 12]. Для определения элементов (Ag, Bi, Cd, Pb, In, Hg, Tl) в образцах в широком диапазоне ультрамалых – повышенных концентраций применяли высокочувствительные методы прямого электротермического атомно-абсорбционного анализа, которые постоянно совершенствовались за время проведения эксперимента. Особенности аналитического подхода заключались в анализе твёрдых порошковых образцов массой до 10 мг и более и микрообразцов взвеси на мембранных ультрафильтрах (часто массой < 1 мг), помещаемых в тигельные графитовые атомизаторы различных конструкций (без какой-либо химической пробоподготовки). Таким образом, уменьшали трудно-контролируемые риски загрязнения образцов и потерь определяемых элементов. При этом хорошим контролем являлось развитие метода определения общего содержания взвешенных и растворённых форм элементов в воде с одновременной атомизацией порошкового концентрата – ДЭТАТА-сорбента (растворённые формы) и взвеси, выделяемых непосредственно в рабочем объёме графитового атомизатора [16, 17].

В работе использованы литературные данные о концентрации элементов во взвеси рек. Авторы не обнаружили конкретных результатов определения тяжёлых металлов в составе взвешенного вещества в промежуточный период: весеннее половодье – летняя межень.

**Обсуждение результатов.** Информация о распространённости элементов (Cd, Pb, Ag, Bi, Hg, In, Tl) в районе ПТЗ (взвеси промежуточного периода (1983–2018 гг.) и взвеси летне-осенней межени в 2008, 2013 гг.) приведена на **рис. 1**.

Для сравнения использованы результаты определения элементов во взвеси участков устьевой зоны р. Сев. Двина, отобранной в разные сезоны в период 1969–2015 гг. [2, 13, 26]. Было учтено, что взвеси этой крупной равнинной реки, слабо подверженной антропогенному влиянию по сравнению с р. Ока, являются достаточно хорошо изученными в геохимическом отношении (определены макро- и многие микроэлементы, в частности, Cd, Pb, Tl, Bi и др.) [2, 5, 13, 14, 19, 21, 26]. Рисунок дополнен оценками средних содержаний элементов во взвеси рек мира по данным нескольких обзорных публикаций [3, 19, 21, 31]. Кроме того, авторы для сравнительной характеристики распространённости элементов в речной взвеси использовали данные для «фоновых» рек двух регионов, отличающихся ландшафтно-геохимическими условиями (Убсунурская котловина с её основными природными зонами [30] и бассейн р. Амазонка [4]).

Наиболее значительный фактический материал характеризует распространённость Cd и Pb. Диапазон изменения концентраций этих элементов во взвеси р. Ока и р. Сев. Двина мало отличается и соответствует весьма широкому интервалу изменений средних значений для взвесей рек мира: Cd – 0,5–1,55 мкг/г; Pb – 25–147 мкг/г [3, 19, 21, 31]. В работе [26] авторы не исключают возможное антропогенное влияние на концентрацию кадмия во взвеси р. Сев. Двина, но отмечают средний уровень значений для речной взвеси. В другой работе [5] взвесь, отобранную в водах р. Сев. Двина, сравнивают с данными по кадмию и свинцу, взятыми из публикации [31] и получают значения отношений < 1 для обоих элементов. Подобный подсчёт также даёт для взвеси р. Ока значение < 1. Однако обратим внимание на следующее обстоятельство: средние концентрации в «фоновой» речной взвеси Убсунурской котловины практиче-



**Рис. 1.** Распространённость элементов в речном взвешенном веществе. Источники информации: 1 – [16, 17, данная работа], 2 – [26], 3 – [5], 4 – [13], 5 – [3, 20, 31], 6 – [4], 7 – [30], 8 – [16, 17, данная работа], 9 – [26], 10 – [5], 11 – [11], 12 – [3, 20, 31], 13 – [4], 14 – [30], 15 – [16, 17, данная работа], 16 – [3, 20], 17 – [4], 18 – [16, 17, данная работа], 19 – [26], 20 – [5], 21 – [21], 22 – [20, 31], 23 – [4], 24 – [16, данная работа], 25 – [3, 20], 26 – [17, данная работа], 27 – [20], 28 – [17, данная работа], 29 – [5], 30 – [14, данная работа], 31 – [3, 20, 31], 32 – [4].

**Fig. 1.** Abundance of the elements in river suspended matter.

ски соответствуют оценкам А.В. Савенко [20] (Cd – 0,4 и 0,5 мкг/г; Pb – 25 и 25 мкг/г) и существенно не отличаются для взвеси р. Амазонка, полученных для сепарационной и фильтрационной взвеси. Поэтому авторы предпочтительно используют оценки средних для взвеси рек мира данных в работе [20], близкие к содержанию элементов в верхней части континентальной коры (см. табл.). Следовательно, для взвеси р. Ока отношение  $Cd_{\text{Ока}}/Cd_{\text{реки мира}} = 1,2$ , а отношение  $Pb_{\text{Ока}}/Pb_{\text{реки мира}} = 1,6$ , т. е. можно отметить некоторое концентрирование свинца во взвеси участка реки в районе ПТЗ.

Данные о распространённости в речной взвеси Ag, Bi, Tl, Hg и In ограничены (см. рис. 1). Можно отметить, что диапазоны содержания Bi и Tl во взвеси р. Ока и р. Сев. Двина сопоставимы и не противоречат оценкам средних для речной взвеси и средним для р. Амазонка. Другие элементы (Ag, Hg, In) не показали сколько-нибудь значительного концентрирования во взвеси р. Ока относительно средних значений для рек мира и для р. Амазонка (Ag).

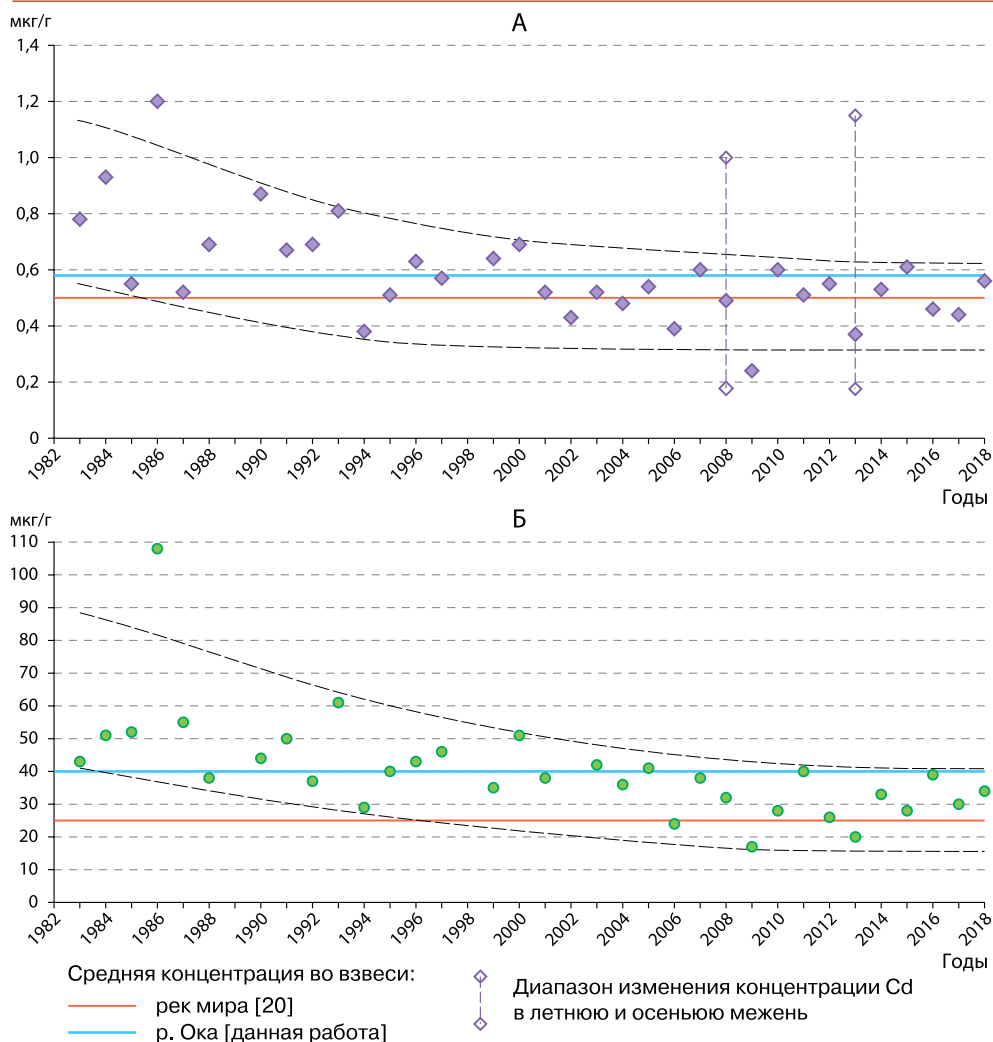
Таким образом, сравнение данных во взвеси участков рек Ока, Сев. Двина, менее подверженной антропогенному влиянию, и «фоновых» рек Убсунурской котловины и р. Амазонка, а также средних для рек мира не позволяют придавать антропогенному фактору значительного влияния. Можно предположить, что более определённый результат следует ожидать при рассмотрении динамики изменения концентрации элементов в период 1983–2018 гг., поскольку происходили изменения степени антропогенного влияния на состав речных вод, в частности, рек Ока и Волга [6, 7, 10, 24, 29], вследствие, прежде всего, уменьшения поступления объёма антропогенных стоков.

Ранее авторы рассматривали изменчивость концентрации растворённых форм Cd и Pb [15]. Содержание элементов изменялось в широком диапазоне концентраций (более порядка величины). Было выделено несколько временных интервалов с разной направленностью изменения концентрации кадмия и свинца. Такие флуктуации концентраций трудно объяснимы без дополнительных экспериментальных данных и характеризуют, по-видимому, часто наблюдаемые факты значительной изменчивости концентраций растворённых форм элементов в речной воде.

Результаты эксперимента по слежению за концентрацией Cd и Pb во взвеси промежуточной фазы реки между весенним половодьем и летней меженью в период 1983–2018 гг. приведены на **рис. 2**, а с дополнительным определением концентраций Ag и Tl в летне-осенней межени в 2008, 2013 гг. – на **рис. 3**. Как видно, концентрации Cd и Pb изменяются в достаточно узком интервале значений (см. **рис. 2**). Единственное существенное увеличение концентрации элементов установлено в 1986 г. По-видимому, этот образец взвеси отражает увеличение степени техногенности состава в зоне смешения сточных вод, техногенных потоков и речных вод (устьевые зоны рек Нара, Речма, впадающих в Оку). Высокие концентрации Cd в техногенной взвеси достигают значений 35–70 мкг/г, а для Pb – 500–900 мкг/г в зоне смешения сточных и речных вод, т. е. в этой зоне происходит формирование техногенной взвеси (см. таблицу). Коэффициент концентрации относительно фоновых значений уменьшается в несколько раз на расстоянии 10–15 км [22]. Отсюда следует, что содержание Cd и Pb в техногенной взвеси в потоке рассеяния в районе г. Серпухов будет заметно выше значений, установленных в 1986 г. (Cd – 1,2 мкг/г, Pb – 108 мкг/г).

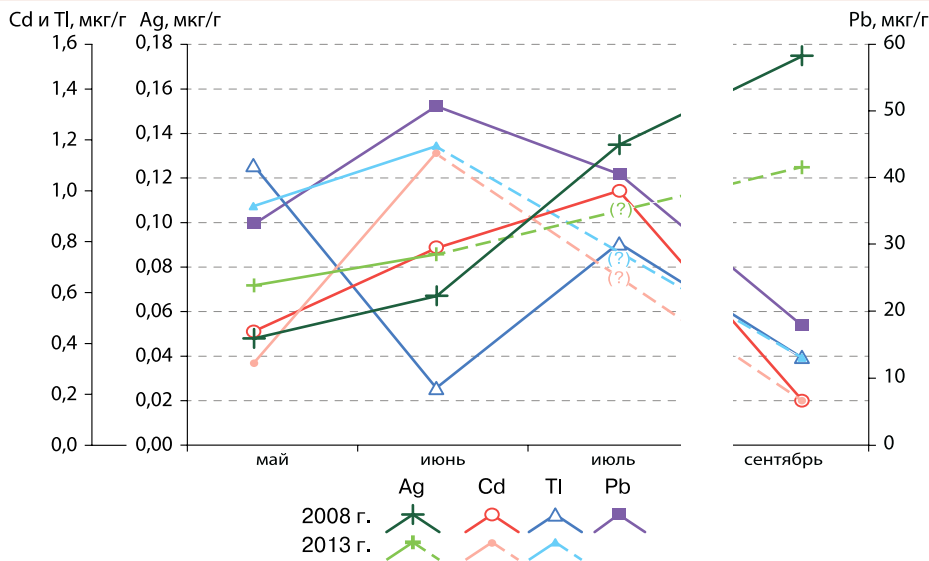
Выявляется сходство в динамике изменения концентраций: плавное уменьшение значений в период 1983–2001 гг. для Cd и 1983–2005 гг. для Pb, с дальнейшим сохранением слабых флуктуаций без тренда уменьшения или увеличения. Сходство в распределении элементов обуславливает их корреляцию ( $r = 0,80$ ; **рис. 4**), которая сохраняется и в том случае, если не учитывать их высокие значения для взвеси 1986 г., с предполагаемой более высокой степенью техногенности. Эти элементы коррелируют ( $r = 0,842$ ) и в образцах взвешенного вещества рек мира, автор не исключает влияние антропогенного фактора [19].

Нарушают достаточно хорошо выраженную направленность изменения концентрации сезонные флуктуации значений в 2008, 2013 гг., если их использовать с целью выявления общей тенденции изменения за весь период эксперимента (см. **рис. 2, 3**). Например, концентрация Cd в летнюю межень значительно возрастает относительно значений промежуточного периода (осеннее половодье – летняя межень), а затем содержание резко падает в осенний период; свинец показывает увеличение, а затем уменьшение значений в летнюю межень и, подобно кадмию, концентрация уменьшается в осенний период. Также отметим значительные сезонные изменения концентраций серебра и таллия в 2008 и 2013 гг., причём для серебра выявляется интересный факт непрерывного увеличения концентрации с мая по сентябрь. Таким образом, попытки использовать результаты определения элементов во взвеси

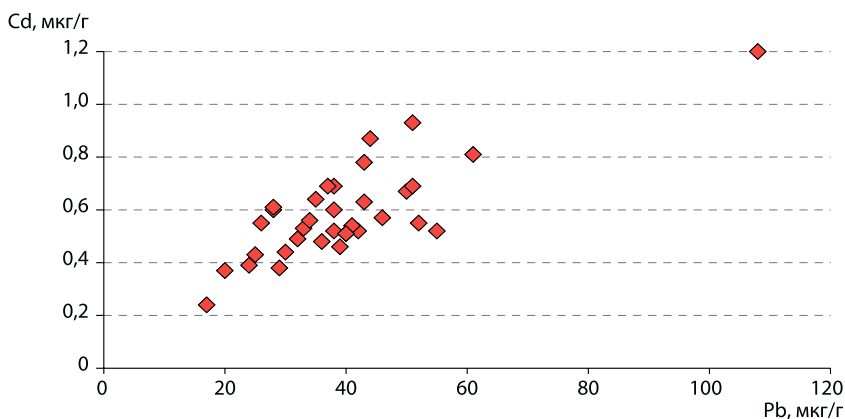


**Рис. 2.** Концентрации Cd (А) и Pb (Б) во взвеси р. Ока в период 1983–2018 гг.  
**Fig. 2.** Concentrations of Cd (A) and Pb (B) in suspension from the Oka River in the period of 1983–2018.

разных сезонов для выявления общей направленности изменений являются мало-перспективными, поскольку будут выделены периоды скачкообразного увеличения–уменьшения концентраций, и общий тренд неизбежно будет завуалирован. Отметим, что значительные сезонные изменения концентраций макрокомпонентов, Cd, Pb и других элементов характерны для речной взвеси, особенно в летнюю межень, при резком увеличении интенсивности биологических процессов и содержания органического вещества, концентрирующего тяжёлые металлы [2, 5, 8, 26]. Следовательно, выявление общей тенденции изменения концентрации элементов во времени является предпочтительным по результатам исследования состава взвеси промежуточного периода, т. е. следует исключить из рассмотрения данные для весеннего половодья и летне-осенней межени.



**Рис. 3.** Сезонная изменчивость концентраций элементов во взвеси р. Ока.  
**Fig. 3.** Seasonal variability of the element concentrations in suspension from the Oka River.



**Рис. 4.** Соотношение Cd и Pb во взвеси р. Ока в период 1983–2018 гг.  
**Fig. 4.** Cd to Pb ratio in suspension from the Oka River in the period of 1983–2018.

Объяснение особенности динамики изменения концентрации, по-видимому, заключается в следующем. Известно, что за последние десятилетия, в особенности с 1990 г., значительно уменьшился объём загрязнённых стоков, поступающих в речные воды [6, 10, 24]. По мнению авторов работы [6], недооценена роль диффузного загрязнения водных объектов в пределах территорий речных бассейнов. Например, объём загрязнённых сточных вод в бассейне р. Волга за период 1990–2017 гг. уменьшился более чем вдвое (бассейн р. Ока является частью бассейна р. Волга). Кроме того, необходимо учесть значительные природоохранные мероприятия по уменьшению загрязнённости вод р. Ока и её притоков (рек Нара, Речма и др.). По результатам исследований в период 1989–1999 гг., загрязнённость поверхностных вод в районе Серпухова снизилась [29]. Вероятно, эти два фактора и обуслови-

ли уменьшение концентрации Cd и Pb в первый период наблюдений в районе ПТЗ. Этот период характеризуется повышенными концентрациями элементов (Cd – 0,69 мкг/г, Pb – 46 мкг/г) по сравнению с выделенным вторым периодом (Cd – 0,49 мкг/г, Pb – 30 мкг/г), который отличается относительным постоянством значений (см. рис. 2). Поэтому концентрации элементов второго периода приближаются к средним значениям для взвесей рек мира [19, 20] и регионов незначительного антропогенного воздействия (см. табл.). Эти значения могут быть рекомендованы в качестве региональных средних концентраций (вероятно, близких к фоновым).

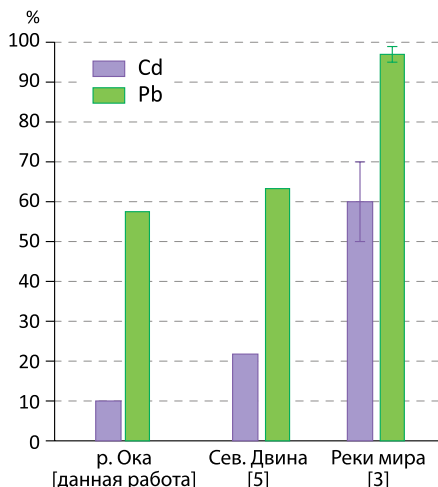
Для решения некоторых задач геологии, геохимии и экологии важной является оценка соотношения взвешенных и растворённых форм элементов в речных водах. Соотношение этих форм сильно изменяется, ведущую роль может играть и та, и другая форма миграции. **Рис. 5** показывает отношение содержания взвешенной формы миграции к сумме растворённых и взвешенных форм в речных водах (в %). В р. Ока в исследуемый период свинец мигрирует, в основном, в составе взвеси, а кадмий – в растворённом состоянии. Несколько возрастает роль взвешенных форм в устьевой зоне р. Сев. Двина. При этом среднее значение данного параметра для рек мира сдвинуто в сторону увеличения роли взвешенной формы миграции элементов: в пределах 50–70 % Cd, 95–99 % Pb [3].

**Закключение.** Результаты слежения за концентрацией металлов во взвеси р. Ока за период 1983–2018 гг. показали отсутствие экстремально высоких значений, превосходящих интервал изменчивости средних «фоновых» значений для рек мира. Впервые по результатам исследования состава взвеси промежуточного периода между весенним половодьем и летней меженью проведена оценка динамики и общей направленности изменения концентрации тяжёлых металлов на участке реки в районе ПТЗ (ниже по течению от зоны формирования техногенного потока рассеяния).

Показано, что концентрации тяжёлых металлов лежат в относительно узком интервале и характеризуют приблизительно два равных временных периода: с «плавным» уменьшением концентраций в первый период и относительным постоянством во второй временной интервал.

Такую направленность изменений в первый период можно объяснить уменьшением общего поступления в бассейн р. Ока загрязнённых стоков различного происхождения и дополнительным, и, по-видимому, значительным снижением влияния промышленно развитой урбанизированной зоны выше по течению от района ПТЗ.

Концентрации элементов во взвеси второго периода ниже значений, соответствующих первому периоду и, вероятно, могут рассматриваться как предварительные «фоновые» региональные (которые отсутствовали). Оценка роли взвешенных и рас-



**Рис. 5.** Доля элементов, мигрирующих во взвешенной форме, в воде р. Ока в послепаводковый период (в районе ПТЗ) в процентах от общего содержания растворённых и взвешенных форм.

**Fig. 5.** Proportion of suspended element migration in the Oka River water during the post-flood period (in the Prioksko-Terrasny Reserve area) as a percentage of the total content of dissolved and suspended forms.

творённых форм миграции элементов в речной воде исследованного участка показала, что миграция свинца осуществляется преимущественно в составе взвешенного вещества, а кадмия – в растворённой форме.

**Благодарности и источники финансирования.** Авторы признательны сотрудникам Лаборатории ландшафтной экологии ИФПБ за ценные советы и замечания, высказанные в ходе обсуждения результатов работы. Исследования проведены в соответствии с темой НИР Института фундаментальных проблем биологии РАН № 122041200035-2.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. 2003. № 7. С. 785–792.
2. Гордеев В.В., Коченкова А.И., Лохов А.С., Яковлев А.Е., Белоруков С.К., Федулов В.Ю. Сезонные межгодовые вариации концентраций и стоков растворённых и взвешенных форм органического углерода, железа и марганца Северной Двины в Белом море // Океанология. 2021. Т. 61, № 1. С. 41–55.
3. Гордеев В.В., Лисицын А.П. Геохимическое взаимодействие пресноводной и морской гидросфер // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5–6. С. 721–744.
4. Гордеев В.В., Орешкин В.Н. Серебро, кадмий и свинец в водах реки Амазонки, её притоков и эстуария // Геохимия. 1990. № 2. С. 244–256.
5. Гордеев В.В., Шевченко В.П., Коробов В.Б., А.И. Коченкова А.И., Стародымова Д.П., Белоруков С.К., Лохов А.С., Яковлев А.Е., Чульцова А.Л., Золотых Е.О., Лобковский Л.И. Концентрации химических элементов в воде и взвеси реки Северная Двина и их годовой валовой сток в Белое море // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500, № 1. С. 95–102.
6. Данилов-Данильян В.И., Полянин В.О., Фащевская Т.Б., Кирпичникова Н.В., Козлова М.А., Веницианов Е.В. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохраных программ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 503–514.
7. Джамалов Р.Г., Никаноров А.М., Решетняк О.С., Сафронова Т.И. Воды бассейна Оки: химический состав и источники загрязнения // Вода и экология. 2017. № 3. С. 114–132.
8. Коновалов Г.С., Иванова А.А., Колесникова Т.Х. Редкие и рассеянные элементы (микроэлементы) в воде и во взвешенных веществах рек Европейской территории СССР // Гидрохимические материалы. 1966. Т. XLII. С. 94–111.
9. Лукашин В.Н., Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Политова Н.В. Геохимия взвешенного вещества в маргинальном фильтре реки Волги // Океанология. 2019. Т. 59, № 3. С. 421–432.
10. Моисеенко Т.И., Кудрявцева Л.П., Гашкина Н.А. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 2006. 261 с.
11. Морозов Н.П., Батулин Г.Н., Гордеев В.В., Гурвич Е.Г. О составе взвесей и осадков в устьевых районах Северной Двины, Мезени, Печоры и Оби // Гидрохимические материалы. 1974. Т. LX. С. 60–73.
12. Орешкин В.Н., Гордеев В.В. Геохимия кадмия и свинца во взвеси рек бассейнов Чёрного, Азовского и Каспийского морей // Геохимия. 1983. № 3. С. 603–613.
13. Орешкин В.Н., Гурвич Е.Г. Кадмий во взвеси и воде устьевых районов бассейнов Северного Ледовитого океана и Чёрного моря // Геохимия. 1981. № 1. С. 136–141.
14. Орешкин В.Н., Гурвич Е.Г. Таллий в материале взвеси устьевых районов рек бассейнов Северного Ледовитого океана Чёрного моря // Океанология. 1994. Т. 34, № 6. С. 842–848.
15. Орешкин В.Н., Хрисанов В.Р. Изменчивость концентрации кадмия и свинца в воде крупной равнинной реки за 30-летний период наблюдений // Жизнь Земли. 2021. Т. 43, № 4. С. 461–471.
16. Орешкин В.Н., Цизин Г.И. Атомно-абсорбционное определение кадмия, свинца и ртути в морских и речных взвесах с применением электротермического атомизатора с двумя зонами испарения // Журнал аналитической химии. 2009. Т. 64, № 12. С. 1251–1255.
17. Орешкин В.Н., Цизин Г.И., Тацкий Ю.Г. Специальные способы термообработки речных и морских взвесей при определении следов элементов // Геохимия. 2018. № 3. С. 290–296.
18. Островская Е.В., Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Монахов С.К., Курапов А.А., Кочарян А.Г. Тяжёлые металлы в системе «Дельта Волги – Северный Каспий» // Геоэкология. Юг России: экология, развитие. 2008. № 4. С. 133–139.

19. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 175 с.
20. Савенко В.С. Химический состав материкового стока твёрдых веществ // Геохимия. 2007. № 8. С. 889–897.
21. Савенко В.С., Покровский О.С., Дюпре Б., Батулин Г.Н. Химический состав взвешенного вещества крупных рек России и сопредельных стран // ДАН. 2004. Т. 398, № 1. С. 97–101.
22. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
23. Снакин В.В. Экология, глобальные природные процессы и эволюция биосферы. Энциклопедический словарь. М.: Изд. Московского университета, 2020. 528 с.
24. Техногенное загрязнение речных экосистем / В.Н. Новосельцев и др. М.: Научный мир, 2002. 140 с.
25. Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В. Мониторинг загрязнения донных отложений тяжёлыми металлами для различных водных объектов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрология. Геокриология. 2023, № 3. С. 65–75.
26. Шевченко В.П., Покровский О.С., Филиппов А.С., Лисицын А.П., Бобров В.А., Богоунов А.Ю., Завернина Н.Н., Золотых Е.О., Исаева А.Б., Кокрятская Н.М., Коробов В.Б., Кравчишина М.Д., Навигатский А.Н., Политова Н.В. Об элементном составе взвеси реки Северная Двина (бассейн Белого моря) // ДАН. 2010. Т. 430, № 5. С. 686–692.
27. Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Кисилёв В.Н. Металлы в речных водах Приморского края // Геохимия. 2007. № 1. С. 79–88.
28. Чудаева В.А. Миграции химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 392 с.
29. Экологическая ситуация в городе Серпухов и перспективы её улучшения / Под ред. С.М. Севостьянова и А.С. Керженцева. 2-е изд. М.: НИА-Природа, 2008. 263 с.
30. Эксперимент «Убсу-Нур». Ч. 1. Наземные исследования / В.В. Бугровский (отв. ред.) и др. М.: Интеллект, 1995. 336 с.
31. Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in world rivers new insight from a new data base // Sci. Total Environ. 2008. V. 407. P. 853–868.

## REFERENCES

1. Grigoriev, N.A., “Average content of chemical elements in rocks composing the upper part of the continental crust”, *Geochemistry* 7, 785–792 (2003) (in Russian).
2. Gordeev, V.V., Kochenkova, A.I., Lokhov, A.S., Yakovlev, A.E., Belorukov, S.K., Fedulov, V.Yu., “Seasonal interannual variations concentrations and effluents of dissolved and suspended forms of organic carbon, iron and manganese of the Northern Dvina in the White Sea”, *Oceanology* 61 (1), 41–55 (2021) (in Russian).
3. Gordeev, V.V., Lisitsyn, A.P., “Geochemical interaction of freshwater and marine hydro-spheres”, *Geology and Geophysics* 55 (5–6), 721–744 (2014) (in Russian).
4. Gordeev, V.V., Oreshkin, V.N., “Silver, cadmium, and lead in the waters of the Amazon River, its tributaries, and the estuary”, *Geochemistry* 2, 244–256 (1990) (in Russian).
5. Gordeev, V.V., Shevchenko, V.P., Korobov, V.B., Kochenkova, A.I., Starodymova, D.P., Belorukov, S.K., Lokhov, A.S., Yakovlev, A.E., Chultsova, A.L., Zolotykh, E.O., Lobkovsky, L.I., “Concentrations of Chemical Elements in the Water and Suspended Matter of the Northern Dvina River and the Annual Gross Runoff to the White Sea”, *Dokl. ross. Acad. Sci. Earth Sciences* 500 (1), 787–793 (2021). DOI 10.1134/S1028334X21090099
6. Danilov-Danilyan, V.I., Polyanin, V.O., Fashevskaya, T.B., Kirpichnikova, N.V., Kozlova, M.A., Venitsianov, E.V., “The problem of reducing diffuse pollution of water bodies and improving the effectiveness of water protection programs”, *Water Resources* 47 (5), 503–514 (2020) (in Russian).
7. Jamalov, R.G., Nikanorov, A.M., Reshetnyak, O.S., Safronova, T.I., “Waters of the Oka basin: chemical composition and sources of pollution”, *Water and Ecology* 3, 114–132 (2017) (in Russian).
8. Kononov, G.S., Ivanova, A.A., Kolesnikova, T.H., “Rare and scattered elements (trace elements) in water and suspended solids of rivers of the European territory of the USSR”, *Hydrochemical materials* XLII, 94–111 (1966) (in Russian).

9. Lukashin, V.N., Kravchishina, M.D., Klyuvitkin, A.A., Novigatsky, A.N., Politova, N.V., “Geochemistry of suspended matter in the marginal filter of the Volga River”, *Oceanology* **59** (3), 421–432 (2019) (in Russian).
10. Moiseyenko, T.I., Kudryavtseva, L.P., Gashkina, N.A., *Dispersed elements in surface waters of land: technophilicity, bioaccumulation and ecotoxicology* (Moscow: Nauka, 2006) (in Russian).
11. Morozov, N.P., Baturin, G.N., Gordeev, V.V., Gurvich, E.G., “On the composition of suspended matter and sediments in the estuarine regions of the Northern Dvina, Mezen, Pechora and Ob”, *Hydrochemical materials* **LX**, 60–73 (1974) (in Russian).
12. Oreshkin, V.N., Gordeev, V.V., “Geochemistry of cadmium and lead in the suspension of rivers of the Black, Azov, and Caspian Sea basins”, *Geochemistry* **3**, 603–613 (1983) (in Russian).
13. Oreshkin, V.N., Gurvich, E.G., “Cadmium in Suspensions and Water of the Estuary Regions of the Arctic Ocean and the Black Sea Basins”, *Geochemistry* **1**, 136–141 (1981) (in Russian).
14. Oreshkin, V.N., Gurvich, E.G., “Thallium in the Suspended Material of the Estuary Regions of the Arctic Ocean and the Black Sea”, *Oceanology* **34** (6), 842–848 (1994) (in Russian).
15. Oreshkin, V.N., Khrisanov, V.R., “Variability of cadmium and lead concentrations in the water of a large plain river over a 30-year observation period”, *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* **43** (4), 461–471 (2021) (in Russian).
16. Oreshkin, V.N., Tsizin, G.I., “Atomic absorption determination of cadmium, lead, and mercury in sea and river suspensions using an electrothermal atomizer with two vaporization zones”, *J. of Analytical Chemistry* **64** (12), 1221–1225 (2009). DOI 10.1134/S1061934809120041
17. Oreshkin, V.N., Tsizin, G.I., and Tsiy, Yu.G., “Special Methods of Thermal Treatment of River and Marine Suspensions for Determining Trace Elements”, *Geochemistry* **3**, 290–296 (2018) (in Russian).
18. Ostrovskaya, E.V., Brekhovskikh, V.F., Volkova, Z.V., Monakhov, S.K., Kurapov, A.A., and Kocharyan, A.G., “Heavy Metals in the Volga Delta–Northern Caspian System”, *Geocology. South of Russia: ecology, development* **4**, 133–139 (2008) (in Russian).
19. Savenko, V.S., *Chemical composition of suspended sediments of the world’s rivers* (Moscow: GEOS, 2006) (in Russian).
20. Savenko, V.S., “Chemical composition of the continental runoff of solids”, *Geochemistry* **8**, 889–897 (2007) (in Russian).
21. Savenko, V.S., Pokrovsky, O.S., Dupre, B., and Baturin, G.N., “Chemical Composition of Suspended Matter in Major Rivers of Russia and Adjacent Countries”, *Dokl. Acad. Sci.* **398** (1), 97–101 (2004) (in Russian).
22. Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P., Smirnova, R.S., Basharkevich, I.L., Onishchenko, T.L., Pavlova, L.N., Trefilova, N.Ya., Achkasov, A.I., Sarkisyan, S.Sh., *Geochemistry of the Environment* (Moscow: Nedra, 1990) (in Russian).
23. Snakin, V.V., *Ecology, Global Natural Processes and the Evolution of the Biosphere. Encyclopedic Dictionary* (Moscow: Moscow University Press, 2020) (in Russian).
24. Novoseltsev, V.N., et al. (eds.), *Technogenic pollution of river ecosystems* (Moscow: Nauchny mir, 2002) (in Russian).
25. Tolkachev, G.Yu., Korzhenevsky, B.I., Kolomiitsev, N.V., “Monitoring of heavy metal pollution of bottom sediments for various water bodies”, *Geocology. Engineering geology. Hydrology. Geocryology* **3**, 65–75 (2023) (in Russian).
26. Shevchenko, V.P., Pokrovsky, O.S., Filippov, A.S., Lisitsy, A.P., Bobrov, V.A., Bogunov, A.Yu., Zavernina, N.N., Zolotykh, E.O., Isaeva, A.B., Kokryatskaya, N.M., Korobov, V.B., Kravchishina M.D., Navigatskaya A.N., Politova N.V., “On the elemental composition of the suspended matter in the Northern Dvina River (White Sea basin)”, *Dokl. Acad. Sci.* **430** (5), 686–692 (2010) (in Russian).
27. Shulkin, V.M., Bogdanova, N.N., Kisilev, V.N., “Metals in the River Waters of Primorsky Krai”, *Geochemistry* **1**, 79–88 (2007) (in Russian).
28. Chudaeva, V.A., *Migrations of Chemical Elements in the Waters of the Far East* (Vladivostok: Dalnauka, 2002) (in Russian).
29. Sevostyanov, S.M., Kerzhentsev, A.S. (eds.), *The environmental situation in the city of Serpukhov and prospects for its improvement* (Moscow: NIA-Priroda, 2008) (in Russian).
30. Bugrovsky, V.V., et al. (ed.), *The “Uvs Nuur” Experiment. Part 1. Basic Research* (Moscow: Intel, 1995) (in Russian).
31. Viers, J., Dupre, B., Gayerde, J., “Chemical composition of suspended matter. sediments in the world’s rivers – a new understanding from a new database”, *Sci. General Environment* **407**, 853–868 (2008).