



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» Физический факультет



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» Филиал в Севастополе

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
«ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ГЕОСРЕДАХ»

ДЕСЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
В ГЕОСРЕДАХ**

МОСКВА, ИПМЕХ РАН, 23 - 25 ОКТЯБРЯ 2024

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ
TENTH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE - SCHOOL
FOR YOUNG SCIENTISTS

**PHYSICAL AND MATHEMATICAL
MODELING OF PROCESSES
IN GEOMEDIA**

MOSCOW, IPMECH RAS, OCTOBER 23 - 25, 2024

PROCEEDINGS

МОСКВА 2024

УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8

ББК 22.2 + 22.3 + 26.2

В

Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Десятая международная научная конференция-школа молодых ученых; 23 - 25 октября 2024 г., Москва: Материалы конференции. – М.: ИПМех РАН, 2024– 184 с.

ISBN 978-5-91741-293-1

В сборнике материалов конференции представлены доклады участников 10-ой Международной научной конференции-школы молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» в виде коротких статей. Тематика Школы охватывает широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований процессов во всех природных средах: в недрах Земли, океане, атмосфере. Центральное место в работе Школы занимают вопросы, связанные с разработкой месторождений углеводородного сырья. Большое внимание уделено исследованию течений в сложных неоднородных жидкостях, экологическим проблемам, изучению антропогенного вклада в динамику природных систем.

Ключевые слова: процессы в геосредах, математическое и лабораторное моделирование, нефтяные и газовые месторождения, неоднородные жидкости, течения в сложных средах.

УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8

ББК 22.2 + 22.3 + 26.2

Key words: geomedia, mathematical and laboratory modelling, oil and gas production, inhomogeneous fluids, fluxes in complex media.

Настоящая работа выполнена в рамках Государственного задания № FMWE-2024-0018.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕЧНОГО СТОКА В УСТЬЯХ МАЛЫХ И КРУПНЫХ РЕК ВОДОСБОРОВ ЮЖНЫХ МОРЕЙ РОССИИ

А.В. Савенко¹

*¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
e-mail: Alla_Savenko@rambler.ru*

Реки юга России впадают во внутренние моря с сильно распресненной водой (Азовское и Черное моря) или Каспийское озеро-море со специфическим составом, а их водосборы охватывают области от гумидного субтропического до семиаридного и аридного климата. Учитывая разнообразие химического состава вод южных рек и морских бассейнов, а также значительную роль малых рек и водотоков в материковом стоке на отдельных участках морских побережий, представляет интерес сравнение закономерностей миграции растворенных веществ в устьях малых и крупных рек Азово-Черноморского бассейна и Каспийского моря.

Материалом для обобщения послужили выполненные в рамках реализуемого под руководством автора проекта РФФ № 24-27-00275 гидрохимические исследования устьев рек Крыма (Альма, Кача, Бельбек, Орта-Узень, Андус, Улу-Узень) 2023–2024 гг. и ранее полученные данные о трансформации макро- и микроэлементного состава вод в зонах смешения малых рек Черноморского побережья (Анапка, Ашамба, Мезыбь, Хотцай, Вулан, Кудепста и Мзымта), а также крупных рек Кубани, Дона, Волги и Урала [1–4, неопубликованные данные А.В. Савенко 2022–2024 гг.].

Консервативное поведение, описываемое линейной зависимостью концентрации растворенного компонента i от содержания хлоридов

$$[i] = a + b[Cl], \quad (1)$$

свидетельствующей об изменении его концентрации только в результате гидродинамического смешения речной и морской водных масс, в устьевых областях всех рассматриваемых рек характерно для натрия, калия, магния, сульфатов и ряда растворенных микроэлементов (Li, Rb, Cs, Sr, Co, Ni, Cu, Cd, Ga, U, F, B, V, As, Sb, Mo). При этом распределение стронция, кобальта, никеля, меди, кадмия, галлия, урана, ванадия, мышьяка и сурьмы, концентрации которых на речной и морской границах зоны смешения различаются менее чем на порядок величины, находится под влиянием сильной пространственно-временной изменчивости химического состава речного стока и в меньшей степени прибрежных морских вод, тогда как для типично морских элементов (натрия, калия, магния, сульфатов, рубидия, цезия, бора и молибдена) этот фактор имеет второстепенное значение.

Поведение растворенного кальция, миграция которого осуществляется в условиях значительных вариаций содержания в речных и морских водах, в устьях большинства малых рек Крыма и Черноморского побережья также относится к консервативному типу, однако в зонах смешения Бельбека, Анапки и Вулана отмечается превышение его концентраций относительно расчетных значений по уравнению (1), достигающее 14, 7 и 30% выноса с речным стоком. Дополнительное поступление гидрокарбонатов более значимо (до 67–110% их содержания в речном стоке с максимумом также для зон смешения Вулана и Бельбека) и проявляется в устьях всех изученных малых рек, кроме самой многоводной Мзымты. Хемогенное образование карбоната кальция, распространенное на устьевых взморьях рек южных регионов и, в частности, Урала и Дона, приводит к синхронному удалению компонентов карбонатной системы из раствора: в устье р. Урал и Таганрогском заливе извлекается до 11–17 и 6–8% поступающих с речным стоком кальция и гидрокарбонатов. Поэтому единственной возможной причиной отмеченного избытка этих компонентов в устьях черноморских рек может быть присутствие в зоне смешения более двух типов вод, в результате чего возникает нарушение линейности зависимости (1) при фактически консервативном поведении компонентов, т.е. при отсутствии их вовлечения во

внутриводные процессы. Третью, дополнительную водную массу, скорее всего, образуют расположенные на материковом склоне рассредоточенные выходы гидрокарбонатно-кальциевых подземных вод, вносящих существенный вклад в общий сток растворенных веществ. В устьях Волги и Кубани также установлена кажущаяся (условная) неконсервативность поведения кальция и связанного с ним стронция, выражающаяся в периодических отклонениях зависимостей (1) от линейного вида, однако в этом случае разделение смешивающихся вод на разные модификации происходит вследствие неодинаковой трансформации материкового стока в проточных и застойных районах устьевого взморья.

Распределение биогенных элементов (минерального, органического фосфора и кремния) в устьях малых рек Крыма и Черноморского побережья неодинаково для разных водных объектов и в различные периоды времени. Пространственно-временная изменчивость и степень неконсервативности их поведения (отклонения концентрации компонента i от линейной зависимости (1)) в устьевых областях рек региона формируются под влиянием двух групп факторов: а) изменчивости химического состава речного стока; б) интенсивности протекания в зоне смешения речных и морских вод внутриводных биологических (ассимиляция гидробионтами, реминерализации органического вещества при взмучивании донных отложений) и химических (сорбционно-десорбционный обмен в поглощенном комплексе речных взвесей) процессов. В устьевых областях Волги, Урала, Кубани и Дона поведение биогенных элементов контролируют эти же факторы, но с явным преобладанием одного из них над другими: 1) для устья Волги и Таганрогского залива главным внутриводным процессом, приводящим к удалению до 60–90 и 16% содержащихся в водах этих рек растворенных фосфатов, а также 46–82 и 8% кремния, служит их ассимиляция водной биотой; 2) для устья Урала наиболее значимо поступление фосфатов в раствор из поровых вод поверхностного слоя донных отложений (в количествах, до 1.5–3 раз превосходящих их вынос речным стоком) при сильном биологическом потреблении кремния (до 58–88% исходной концентрации); 3) для устья Кубани главную роль в трансформации потоков фосфатов и кремния играет их поступление из поровых вод донных отложений, достигающее 25–50 и 6–10% содержания в речном стоке.

Линейные зависимости концентрации растворенного бария от содержания хлоридов (1) наблюдаются только в устьях Бельбека и Ашамбы, тогда как в устьях Альмы, Качи, Вулана, Анапки, Мезыби и Хотецая максимальная десорбция этого элемента составляет 8–20% содержания в речных водах, в устье Кудепсты – сравнима с выносом речным стоком, а в устье Мзымты – превышает его почти в 4 раза. В устье Урала барий интенсивно десорбируется с терригенного материала на начальном этапе осолонения в количестве, достигающем 20% его поступления с речными водами, а на устьевом взморье его поведение становится близким к консервативному. Для зон смешения волжских и каспийских вод, а также кубанских и азовских вод характерно похожее распределение бария с более растянутой по диапазону хлорности зоной десорбции, в пределах которой в раствор дополнительно поступает до 52 и 20% содержания бария в речном стоке.

Поведение растворенных форм марганца, железа, свинца, алюминия, иттрия, редкоземельных элементов и титана в устьевых областях рек южных регионов России, как и большинства рек мира, обусловлено доминированием прочных комплексов с образующим коллоидную фракцию растворенным органическим веществом, что приводит к резкому снижению подвижности этих элементов уже на ранних стадиях смешения с морской водой в результате коагуляции и флокуляции органических и органоминеральных коллоидов. Степень удаления элементов из раствора в устьях разных рек и в различные периоды времени варьируется в довольно широких пределах и зависит от их содержания в речных водах и химического состава последних (главным образом от содержания и состава органического вещества). При этом для марганца, железа, свинца, алюминия, иттрия и титана оба фактора сопоставимы по значимости, тогда как для редкоземельных элементов ведущую роль играет их содержание в речном стоке. Максимальные потери марганца, железа и алюминия в большинстве случаев находятся в диапазоне 14–48%, хотя для устьев некоторых рек поведение этих элементов постоянно или в

отдельные периоды близко к консервативному, а иногда их удаление из раствора достигает 67–85%. Сток растворенных свинца, иттрия и титана в зоне активной флокуляции коллоидов уменьшается соответственно на 65–80, 45–68 и 12–65%; редкоземельных элементов – на 34–54...66–89% с минимумом для европия и максимумом для гадолиния и диспрозия. Для устьевых областей Волги и Урала, несмотря на специфику химического состава вод Северного Каспия, оценки потерь элементов этой группы на геохимическом барьере река–море за редкими исключениями (консервативное поведение иттрия, более интенсивное удаление титана) близки к таковым для устьев малых рек Крыма и Черноморского побережья.

Таким образом, сравнительная характеристика миграции главных ионов и растворенных микроэлементов в устьевых областях малых и крупных рек Азово-Черноморского бассейна и Каспийского моря позволила сделать следующие выводы:

– Для всех изученных устьев рек установлено консервативное поведение Na, K, Mg, SO₄, Li, Rb, Cs, Sr, Co, Ni, Cu, Cd, Ga, U, F, B, V, As, Sb и Mo, а также условно неконсервативное, т.е. фактически соответствующее консервативному поведение кальция и гидрокарбонатов, обусловленное присутствием в зоне смешения речных и морских вод третьей, дополнительной водной массы (распределенного подземного стока в устьях малых рек и неодинаковой трансформации материкового стока в проточных и застойных районах устьевых взморий крупных рек);

– Подверженное сильной пространственно-временной изменчивости неконсервативное распределение биогенных элементов (P_{мин}, P_{орг}, Si) зависит от химического состава речного стока и интенсивности протекания в зоне смешения речных и морских вод внутриводоемных биологических (ассимиляция гидробионтами, реминерализации органического вещества при взмучивании донных отложений) и химических (сорбционно-десорбционный обмен в поглощенном комплексе речных взвесей) процессов, при этом соотношение роли указанных факторов индивидуально для каждого из изученных объектов;

– Барий десорбируется с терригенного материала при его проникновении в морскую среду, причем для устьев малых рек десорбция этого элемента изменяется от предела аналитической чувствительности до 4-кратного превышения содержания в речном стоке, тогда как для устьев крупных рек трансформация поглощенного комплекса взвешенного вещества более стабильна и приводит к дополнительному поступлению в раствор до 20–50% бария;

– Степень удаления из раствора присутствующих в составе органических и органоминеральных коллоидов Mn, Fe, Pb, Al, Y, редкоземельных элементов и Ti в результате их коагуляции и флокуляции при смешении с морской водой неодинакова для устьев разных рек и в различные периоды времени и контролируется содержанием элементов и органического вещества в речных водах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00275, <https://rscf.ru/project/24-27-00275/>.

Литература/References:

1. Савенко А.В. Геохимия стронция, фтора и бора в зоне смешения речных и морских вод. М.: ГЕОС, 2003. 170 с.
2. Савенко А.В., Бреховских В.Ф., Покровский О.С. Миграция растворенных микроэлементов в зоне смешения вод Волги и Каспийского моря (по многолетним данным) // Геохимия. 2014. № 7. С. 590–604.
3. Савенко А.В., Покровский О.С. Трансформация стока растворенных веществ в устье р. Урал // Геохимия. 2020. Т. 65. № 8. С. 811–822.
4. Савенко А.В., Покровский О.С. Трансформация макро- и микроэлементного состава стока растворенных веществ в устьях средних и малых рек Черноморского побережья России // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 380–402.