

УДК 551.4

ХАРАКТЕРИСТИКА МАРГИНАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ЭСТУАРИЯ РЕКИ ИНДИГА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Котова Е.И., Мискевич И.В., Мосеев Д.С., Чульцова А.Л.

ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва,
e-mail: ecopp@yandex.ru

Рассмотрены условия формирования экосистем мезоприливных устьев рек западного сектора российской Арктики в летнюю межень на примере эстуария реки Индига в Баренцевом море. Выявлено, что весь эстуарий, протяженностью 30 км, в полную воду приливного цикла занимает зона смешения речных и морских вод. Процессы рассматривались в рамках модели маргинального фильтра. Обнаружено, что гравитационной ступени маргинального фильтра соответствует интервал солености менее 5 ‰, коагуляционно-сорбционной ступени – 5–30 ‰, а биологическая ступень вытесняется за пределы эстуария. Предполагается, что максимальная биологическая продуктивность зоны смешения речных и морских вод наблюдается на заливных лайдах в лагунных (пойменных) озерах, где кислородонасыщение составляло 117–144%. В самом эстуарии этот показатель обычно не превышал 102%. Здесь формируется широкое разнообразие галофитов, водоплавающей и околоводной орнитофауны, включая их охраняемые виды. В зоне наибольшей мутности вод около вершины эстуария содержание взвеси достигало 86–110 мг/л. Максимум содержания взвеси на входе в эстуарий отмечался на малой воде приливного цикла, в центре эстуария – на половине фазы прилива, в вершине эстуария – на полной воде прилива. На коагуляционно-сорбционной ступени маргинального фильтра эстуария р. Индига наблюдалось наличие нелинейных связей распределения солености с изучаемыми параметрами. Зафиксировано значительное снижение насыщения эстуарных вод кислородом с минимумом до 95% и снижение величины pH с минимумом до 7,8–7,9 в диапазоне солености 12–29 ‰. Наличие локального максимума растворимого общего фосфора до 20–27 мкг/л наблюдалось в диапазоне солености 10–20 ‰. Отмечена высокая величина pH речных вод (8,3–8,5) из-за широкого распространения на водосборе реки карбонатных пород. Сделан вывод о большой уязвимости экосистемы эстуария р. Индига к аварийным разливам нефти.

Ключевые слова: Арктика, Индига, эстуарий, прилив, гидрология, гидрохимия, экосистема, маргинальный фильтр

CHARACTERISTICS OF THE MARGINAL FILTER IN THE INDIGA ESTUARY (BARENTS SEA)

Kotova E.I., Miskevich I.V., Moseev D.S., Chultsova A.L.

P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, e-mail: ecopp@yandex.ru

Conditions of ecosystem formation in mesotid river estuaries of the western sector of the Russian Arctic in the summer low tide on the example of the Indiga River estuary in the Barents Sea have been considered. It was revealed that the whole estuary, 30 km long, is occupied by the zone of mixing of river and sea waters in the full water of the tidal cycle. The processes were considered within the marginal filter model. It was found that the gravity stage of the marginal filter corresponds to a salinity interval of less than 5 ‰, the coagulation-sorption stage to 5–30 ‰, and the biological stage is displaced beyond the estuary. It is supposed that maximum biological productivity of the zone of river and sea water mixing is observed on bay lakes in lagoon (floodplain) lakes, where oxygen saturation was 117–144%. Oxygen saturation usually did not exceed 102% in the estuary. A wide diversity of halophytes, waterfowl and near-water ornithofauna, including their protected species, is formed here. In the zone of the highest turbidity of water near the top of the estuary the suspended solids content reached 86–110 mg/l. Maximum suspended sediment content at the estuarine inlet was observed at low tide water, in the estuarine center – at the half tide phase, at the estuarine top – at full tide water. At the coagulation-sorption stage of the marginal filter of the Indiga River estuary, nonlinear relationships of salinity distribution with the studied parameters were observed. Significant turbidity in oxygen saturation of estuarine waters with minimum (up to 95%) and decrease in pH value with minimum up to 7.8–7.9 in the salinity range of 12–29 ‰ were recorded. The presence of a local maximum of soluble total phosphorus up to 20–27 µg/l was observed in the salinity range of 10–20 ‰. The high pH value of river water (8.3–8.5) was noted due to the wide distribution of carbonate rocks in the river watershed. It is concluded that the ecosystem of the Indiga River estuary is highly vulnerable to accidental oil spills.

Keywords: Arctic, Indiga, estuary, tide, hydrology, hydrochemistry, ecosystem, marginal filter

Разнообразие природных условий в западном секторе Арктики обуславливает разнообразие устьевых участков рек, впадающих в арктические моря. К мезоприливному устьям рек относятся те, на устьевых взморьях которых в сизигию величина прилива достигает 1,6 м и более, но не превышает 2,6 м. Они получили наиболее широкое распространение в Белом море и в юго-восточной части Баренцева моря. Мезопри-

ливные устья малых и средних рек также могут встречаться в Карском море и море Лаптевых при их расположении в вершинах воронкообразных заливов с осью, направленной по траектории движения приливной волны. В XXI в. в российской Арктике их число может увеличиться из-за уменьшения ледового покрова Северного Ледовитого океана [1], который препятствует возрастанию интенсивности приливных явлений.

Несмотря на то, что растет число исследований водного режима и динамики вод в небольших арктических устьях [2], мезоприливные устья рек являются малоизученными водными объектами арктической зоны России.

Целью выполненных исследований являлась оценка специфики гидролого-гидрохимических и гидробиологических процессов в мезоприливной эстуарии в летнюю межень на примере устья р. Индига в Баренцевом море. Полученные результаты будут способствовать решению ряда научных и прикладных задач, возникающих при освоении природных ресурсов арктической зоны России.

Материалы и методы исследования

Индига относится к так называемым средним рекам (площадь водосбора составляет 3790 км²) и образует при впадении в море воронкообразный эстуарий протяженностью около 30 км. В эстуарий Индиги впадает ряд малых рек (боковых притоков), к наиболее крупным из которых относятся правобережная Большая Щелиха и левобережные Вырей и Иевка. Средняя сизигийная величина прилива при входе в эстуарий составляет 2,0 м, максимально возможная по астрономическим причинам величина прилива здесь достигает 2,52 м.

Полевые работы в эстуарии р. Индига, включая его два боковых притока (Большая Щелиха и Иевка) и их пойменные озера, были проведены в период с 21 июля

по 1 августа 2022 г. Были выполнены серии гидролого-гидрохимических полусуточных наблюдений на трех станциях с дискретностью 2 ч в зоне смешения речных и морских вод и два разреза на шести станциях на полной воде в устьях боковых притоков. Координаты станций отбора проб воды представлены в табл. 1. Станция *1u* располагалась на удалении 3 км от морской границы эстуария р. Индига, станция *2u* – 17 км и станция *3u* – 26 км. На разрезах первая станция располагалась на границе бокового притока с эстуарием, остальные были удалены друг от друга на 3 км вверх по течению. Около участков расположения полусуточных станций и в устьях рек Большая Щелиха и Иевка выполнены 17 геоботанических профилей и обследовано 48 геоботанических площадок вне этих профилей. Проведены орнитологические наблюдения на пяти маршрутах.

Колебания уровней воды замерялись водомерными рейками с привязкой к условному нулю поста. Температура воды, соленость (минерализация) и содержание кислорода определялись с помощью многопараметрического анализатора жидкости *Multi 3420* фирмы *WTW*, величина рН – с помощью рН-метра *Марк-903*. Выделение взвеси проводилось методом мембранной ультрафильтрации под вакуумом через чистые (обработанные 4 %-ной соляной кислотой и тщательно промытые бидистиллированной водой) ядерные фильтры.

Таблица 1

Координаты станций отбора проб воды
в устьевой области р. Индига в июле 2022 г.

Номер станции	Координаты (с.ш., в.д.)		Наименование водного объекта	Примечания
	Широта	Долгота		
<i>1u</i>	67°42'08"	48°44'49"	Эстуарий р. Индига (м. Корга-Нос)	Полусуточная станция
<i>2u</i>	67°39'05"	49°02'07"	Эстуарий р. Индига (п. Индига)	Полусуточная станция
<i>3u</i>	67°37'11"	49°04'03"	Эстуарий р. Индига (м. Грязный)	Полусуточная станция
<i>1щ/и</i>	67°39'09,3"	49°02'22,9"	Устье р. Большая Щелиха	Разрез на трех станциях
<i>2щ/и</i>	67°38'53,2"	49°04'15,3"	Устье р. Большая Щелиха	
<i>3щ/и</i>	67°38'26,8"	49°06'50,5"	Устье р. Большая Щелиха	
<i>1и/и</i>	67°38'06,6"	48°56'40,7"	Устье р. Иевка	Разрез на трех станциях
<i>2и/и</i>	67°36'47,6"	48°55'46,9"	Устье р. Иевка	
<i>3и/и</i>	67°35'36,1"	48°56'22,4"	Устье р. Иевка	
<i>1о/и</i>	67°38'40"	49°05'55"	Б/и озеро в устье р. Бол. Щелиха	
<i>2о/и</i>	67°38'40"	49°06'11"	Б/и озеро в устье р. Бол. Щелиха	
<i>3о/и</i>	67°36'57"	48°56'21"	Б/и озеро в устье р. Иевка	

Предварительное взвешивание ядерных фильтров осуществлялось на электронных лабораторных весах «*Adventurer Pro*» model RV214 (производства фирмы «*OHAUS Europe*», Швейцария, со специальным классом точности и ценой деления 0,1 мг). Использовались ядерные фильтры (диаметр – 47 мм, диаметр пор – 0,45 мкм), изготовленные в Объединенном институте ядерных исследований в г. Дубна. Для определения растворенной формы общего фосфора использовался метод предложенный Королёвым и уточненный Вальдеррамом. Он основан на окислении фосфорсодержащих органических соединений до фосфатов.

В статистическом анализе применялись как общепринятые статистики (среднеарифметическое значение и среднеквадратичное отклонение), так и робастные (помехоустойчивые) параметры. Последние не зависят от вида статистического закона распределения изучаемых данных. Для этой цели применялись медиана и квартили. Межквартильный диапазон величин, ограниченный верхним квартилем (75% точкой) и нижним квартилем (25% точкой), соответствует статистическому «ядру» исследуемой выборки, и его условно можно считать характерным интервалом изменчивости концентраций взвеси [3]. Результаты статистических расчетов приведены в табл. 2.

Результаты исследования и их обсуждение

Состояние экосистемы эстуария р. Индига целесообразно рассматривать в рамках модели маргинального фильтра, предложенной академиком А.П. Лисициным [4]. Согласно этой модели при смешении речных и морских вод при возрастании солёности формируются три последовательные зоны – гравитационная ступень (мутявая «пробка»), коагуляционно-сорбционная ступень и биологическая ступень. В пределах первой ступени наблюдается наибольшая мутность устьевых вод, на второй степени наиболее ярко проявляют себя геохимические процессы, и в третьей зоне наблюдается значительное повышение биомассы гидробионтов. Например, в Белом море для устьевой области р. Северной Двины первой зоне соответствует диапазон солёности 0,5–5 ‰, второй зоне – 5–20 ‰ и третьей зоне – солёность более 20 ‰ [5]. Сразу необходимо заметить, что вышеуказанная модель хорошо отражает процессы, про-

исходящие только в устьях больших рек. В приливных устьях малых рек арктической зоны России чередование ступеней маргинального фильтра может иметь иной характер [6]. Проявление маргинального фильтра в приливных устьях средних рек остается практически не изученным.

Анализ результатов проведенных исследований эстуария р. Индига позволяет предположить следующее (табл. 2–3). Зона смешения речных и морских вод в полную воду прилива в летнюю межень заполняет весь эстуарий на протяжении 30 км. На малой воде прилива в его вершине речные воды могут наблюдаться около о. Сорванный (около створа 28 км выше морской границы эстуария). Фронтальный раздел по солёности устьевых вод локализуется на центральном участке эстуария около п. Индига. Здесь полусуточная приливная изменчивость солёности по нашим наблюдениям достигала 10 ‰. На морской границе эстуария в июле 2022 г. она не превышала 2 ‰.

Графики связи солёности с взвешенными веществами и гидрохимическими показателями представлены на рисунке. Они показывают, что мутьевой «пробке» соответствует интервал солёности менее 5 ‰, а коагуляционно-сорбционной ступени – 5–30 ‰.

В зоне наибольшей мутности вод около вершины эстуария содержание взвеси достигало 86–110 мг/л. Её максимум на входе в эстуарий отмечался на малой воде приливного цикла, в центре эстуария – на половине фазы прилива и в вершине эстуария – на полной воде прилива.

На коагуляционно-сорбционной ступени маргинального фильтра эстуария р. Индига наблюдалось наличие нелинейных связей распределения солёности с исследуемыми параметрами. Зафиксировано наличие следующих явлений:

- значительное снижение насыщения эстуарных вод кислородом с минимумом (до 95 %) в диапазоне солёности 12–29 ‰;
- снижение величины рН с локальным минимумом до 7,8–7,9 в том же диапазоне, что и для кислородонасыщения;
- возрастание концентраций растворимого общего фосфора с локальным максимумом до 20–27 мкг/л в диапазоне солёности 10–20 ‰.

Первое явление, скорее всего, обусловлено последствиями влияния повышенной мутности эстуарных вод на фотосинтез микроводорослей.

Таблица 2

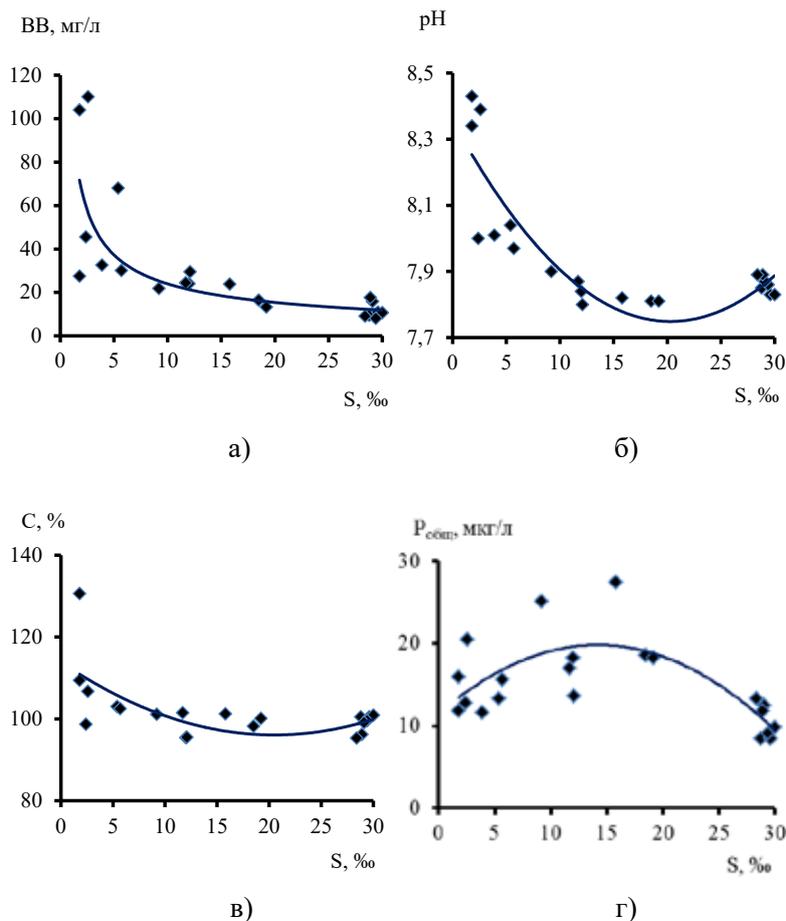
Статистическая характеристика полусуточной изменчивости
гидролого-гидрохимических показателей
на полусуточных станциях в эстуарии р. Индига в июле 2022 г.

Статистики	Показатели					
	T, °C	S, ‰	Взвесь, мг/л	O ₂ , %	pH	P _{общ} [?] мкг/л
Станция 1и (23.08.2022 г.)						
Среднее значение	14,0	29,17	11,6	98,9	7,86	10,4
Стандартное отклонение	0,4	0,54	3,6	2,2	0,03	2,0
Медиана	14,1	29,10	10,6	99,6	7,86	9,8
Нижний квартиль (25 %)	13,7	28,85	9,2	97,7	7,84	8,7
Верхний квартиль (75 %)	14,2	29,50	13,3	100,5	7,88	12,1
Максимальное значение	14,5	30,00	17,6	100,9	7,89	13,3
Минимальное значение	13,4	28,40	8,0	95,3	7,83	8,4
Станция 2и (22.08.2022 г.)						
Среднее значение	19,5	14,07	21,9	99,0	7,84	19,7
Стандартное отклонение	0,9	3,80	5,4	2,7	0,04	4,8
Медиана	19,0	12,10	23,8	100,1	7,82	18,2
Нижний квартиль (25 %)	18,8	11,85	19,1	96,8	7,81	17,6
Верхний квартиль (75 %)	20,1	17,15	24,2	101,2	7,86	21,8
Максимальное значение	21,0	19,20	29,4	101,5	7,90	27,4
Минимальное значение	18,7	9,20	13,2	95,4	7,80	13,6
Станция 3и (27.08.2022 г.)						
Среднее значение	18,3	3,37	59,6	107,2	8,17	14,5
Стандартное отклонение	1,6	1,65	35,2	11,0	0,21	3,2
Медиана	17,8	2,60	45,5	103,0	8,04	13,3
Нижний квартиль (25 %)	17,8	2,10	31,3	101,1	8,01	12,3
Верхний квартиль (75 %)	19,3	4,65	86,0	108,1	8,37	15,8
Максимальное значение	20,6	5,70	110,0	130,6	8,43	20,5
Минимальное значение	15,7	1,80	27,5	98,7	8,0	11,6
Количество наблюдений	7	7	7	7	7	7

Таблица 3

Результаты гидролого-гидрохимических наблюдений на разрезах
в боковых притоках эстуария р. Индига в полную воду приливного цикла

Номер станции	Время	T, °C	S, ‰ (мг/л)	Взвеси, мг/л	Кислород		pH
					мг/дм ³	%	
Устье р. Большая Щелиха (26.08.2022 г.)							
1ц/и	14.15	16,4	19,2	25,4	10,54	108,6	7,94
2ц/и	14.35	16,5	15,4	21,2	10,15	104,2	7,86
3ц/и	14.55	16,4	4,8	15,4	10,46	107,6	7,95
Устье р. Иевка (24.08.2022 г.)							
1и/и	12.53	15,8	8,5	18,8	10,01	101,3	7,91
2и/и	13.30	15,9	3,2	9,0	10,27	104,7	7,91
3и/и	14.10	16,5	(346)	4,6	10,20	105,9	8,05



Графики связи солености (S , ‰) в эстуарии р. Индига в июле 2022 г.:
 а) с содержанием взвеси (ВВ, мг/л), б) с величиной pH,
 в) с кислородонасыщением (C , ‰), г) с растворенным общим фосфором ($P_{общ}$, мкг/л)

Второе явление, очевидно, связано с выпадением в осадок кальция при изменении солевого состава вод зон смешения речных и морских вод. При этом необходимо отметить широкое распространение на водосборе р. Индига карбонатных пород, что, в частности, влечет за собой высокую величину pH речных вод (8,3–8,5). Увеличение содержания общего фосфора можно объяснить влиянием стока вод с лайд, где отмечается, если ориентироваться на показания кислородонасыщения, значительная биопродуктивность лагунных озер и их сильная загрязненность фекалиями водоплавающих птиц.

Биологическая ступень маргинального фильтра, видимо, вытесняется в морские воды Индигской губы на глубины более 10 м с соленостью более 30 ‰. С другой стороны, высокое кислородонасыщение лагунных (пойменных) озер (табл. 4), заливаемых морской водой на приливах, и обилие галофитной растительности на лайдах эстуа-

рия позволяет предположить, что именно здесь формируется наиболее высокая биологическая продуктивность солоноватых вод. Этому способствует значительная величина прилива, формирующая довольно обширные лайды (заливные морские луга) в мористой и центральной частях эстуария. В свою очередь, такие природные образования способствуют обитанию здесь широкого перечня водоплавающих и околоводных птиц, а также хищных представителей приморской орнитофауны.

Формированию высокой биологической продуктивности эстуарных вод в диапазоне солености 25–30 ‰, очевидно, мешает баровая отмель с глубинами менее 2 м на малой воде прилива в южной части Индигской губы. При наличии ветрового волнения и сильных приливных течений здесь формируются неблагоприятные гидродинамические и литодинамические условия для развития морских гидробионтов и водорослей.

Таблица 4

Результаты гидролого-гидрохимических наблюдений
на пойменных (лагунных) озерах боковых притоков эстуария р. Индига

Номер станции	T, °C	S, ‰ (мг/л)	Кислород	
			мг/дм ³	%
Устье р. Большая Щелиха				
1o/u	19,9	9,7	13,62	143,7
2o/u	19,7	1,0	10,75	116,6
Устье р. Иевка				
3o/u	16,8	11,4	9,84	117,4

Заключение

Полученные результаты можно предвзительно использовать для оценки возможных последствий для экосистемы р. Индига аварийного разлива нефти на акватории проектируемого морского глубоководного порта [7] на западной границе Индигской губы. Согласно общим представлениям о циркуляции вод в рассматриваемом районе такой разлив при отсутствии мер по его ликвидации приведет к попаданию аварийной нефти в эстуарий Индиги и в конечном счете к его полному загрязнению. При этом должна наблюдаться её аккумуляция на лайдах и в лагунных озерах, что приведет к уничтожению биотопов водоплавающих птиц, среди которых регистрируется значительное число охраняемых видов. Необходимо также помнить, что в период существования СССР в устье Индиги, наряду с устьем Печоры, производился промышленный лов сёмги. Помимо этой рыбы на рассматриваемом водном объекте встречаются голец, кумжа, горбуша, нельма, омуль, сиг-пыжьян, пелядь. Это необходимо учитывать при разработке природоохранных мероприятий для проектируемого морского порта.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Современные и древние донные осадки и взвесь Мирового океана – геологическая летопись изменений среды и климата: рассеянное осадочное вещество и донные осадки морей России, Атлантического, Тихого и Север-

ного Ледовитого океанов – литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования; изучение загрязнений, палеообстановок и процессов в маргинальных фильтрах рек» № FMWE-2021-0006. Полевые исследования проведены при финансовой поддержке гранта № 297-Г от 10.02.2022 г., выделенного АНО «Экспертный Центр – Проектный офис развития Арктики (ПОРА)».

Список литературы

- Оганесян В.В. Климатические изменения как факторы риска для экономики России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3 (373). С. 161–184.
- Магрицкий Д.В., Повалишников Е.С., Фролова Н.Л. История изучения стока воды и водного режима рек Арктической зоны России в XX в. и начале XXI в. // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 61–96. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29939.
- Мискевич И.В., Деменков О.В. Оценка влияния хозяйственной деятельности в районе острова Варандей на геоэкологическую ситуацию в Печорском море // Успехи современного естествознания. 2021. № 5. С. 88–93. DOI: 10.17513/use.37628.
- Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Шевченко В.П., Филиппов А.С., Новигатский А.Н., Гордеев В.В., Горюнова Н.В., Демина Л.Л. Рассеянное осадочное вещество пресноводных и морских льдов // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 169–200.
- Miskevich I.V., Korobov V.B., Moseev D.S. Specifics of Marginal Filter Formation in the Tidal Estuaries of Small Rivers of the Arctic Seas // Oceanology. 2021. Vol. 61. No 1. P. 127–131. DOI: 10.1134/S0001437021010136.
- Перспективный порт Индига: зачем России новое «окно в Арктику» [Электронный ресурс]. URL: <http://tehnovar.ru> (дата обращения: 07.08.2022).