

ОСОБЕННОСТИ МЕЗОПРИЛИВНЫХ УСТЬЕВ РЕК АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ В УСЛОВИЯХ ЛЕТНЕЙ МЕЖЕНИ (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ИНДИГИ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ)

FEATURES OF MESOTIDAL ESTUARIES OF THE RIVERS IN THE
ARCTIC ZONE OF RUSSIA DURING THE CONDITIONS OF SUMMER
LOW WATER (ON THE EXAMPLE OF THE
INDIGA RIVER IN THE BARENTS SEA)

Мискевич И. В.

Котова Е. И.

Мосеев Д. С.

Miskevich I. V.

Kotova E. I.

Moseev D. S.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Баренцево море, эстуарий Индиги, прилив, маргинальный фильтр, гидрохимия, экосистема

KEY WORDS:

Barents Sea, Indiga estuary, tide, marginal filter, hydrochemistry, ecosystem

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены особенности маргинального фильтра мезоприливных устьев рек западного сектора российской Арктики на примере эстуария р. Индиги в Баренцевом море. Протяженность зоны смешения морских и речных вод здесь достигает 30 км. Выявлено, что при наличии открытого мелководного устьевого взморья в эстуарии в летнюю межень располагаются только гравитационная и коагуляционно-сорбционная ступени. Биологическая ступень вытесняется за пределы устьевого объекта в море, где наблюдаются снижение скоростей приливных течений и ослабление процессов гидродинамического взмучивания донных отложений. При этом внутри эстуария повышенная биологическая продуктивность наблюдается в лагунных озерах, располагающихся на приморских заливных лугах. Здесь отмечается высокое биоразнообразие галофитной растительности и орнитофауны. Данные эстуарные участки являются наиболее уязвимыми зонами по отношению к аварийным разливам нефти, что необходимо учитывать при разработке природоохранных мероприятий для проектируемого морского порта на границе Индигской и Чёшской губ.

ABSTRACT

The features of the marginal filter of the mesotidal mouth of the river in the western sector of the Russian Arctic are considered on the example of the estuary Indiga in the Barents Sea. The length of the zone of mixing of sea and river waters here reaches 30 km. It was revealed that in the presence of an open shallow estuarine seashore of the river in the estuary in the summer low water, only gravity and coagulation-sorption stages are located. The biological stage is displaced beyond the estuarine object into the sea, where a decrease in the velocities of tidal currents and a weakening of the processes of hydrodynamic resuspension of bottom sediments are observed. At the same time, within the estuary, increased biological productivity is observed in lagoon lakes located on coastal water meadows. There is a high biodiversity of halophyte

vegetation and avifauna. These estuarine areas are the most vulnerable zones in relation to accidental oil spills, which must be taken into account when developing environmental measures for the projected seaport on the border of the Indiga and Cheshskaya bays.

МИСКЕВИЧ И. В.

Доктор геогр. наук, ведущий научный сотрудник Северо-Западного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

—
vikingm@arh.ru

Miskevich I. V.

Doctor of geographical sciences, leading researcher of the North-Western Branch of the Shirshov Institute of Oceanology RAS.

—
vikingm@arh.ru

КОТОВА Е. И.

Канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, директор Северо-Западного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

—
ecopp@yandex.ru

Kotova E. I.

PhD in Geography, leading researcher, director of the North-Western Branch of the Shirshov Institute of Oceanology RAS.

—
ecopp@yandex.ru

МОСЕЕВ Д. С.

Научный сотрудник Северо-Западного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

—
szoioras@yandex.ru

Moseev D. S.

Researcher of the North-Western Branch of the Shirshov Institute of Oceanology RAS.

—
szoioras@yandex.ru

Устья рек, впадающих в моря западного сектора российской Арктики, отличаются наиболее сложными геоэкологическими условиями среди других водных объектов, вследствие наличия в них фронтальной зоны между пресными и солеными водами, подверженной короткопериодным миграциям под действием приливов, и ярко выраженной контрастности сезонных гидрометеорологических условий. В настоящее время все устьевые области больших рек в рассматриваемом регионе изучены сравнительно неплохо, однако, в отношении устьев средних и малых рек этого сказать нельзя. Здесь и далее размеры рек классифицируются по ГОСТ 19179-73 «Гидрология суши. Термины и определения».

Среди устьев средних и малых рек морей Арктической зоны РФ наиболее малоизученными являются мезоприливные устья рек, на устьевых взморьях которых в сизигию величина прилива достигает 1,6 метра и более, но не превышает 2,6 метра [1]. Они характерны для Белого и Баренцева морей, но также встречаются в Карском море при расположении устьев рек в вершинах воронкообразных заливов с осью, направленной по траектории движения приливной волны. В текущем столетии их количество может увеличиться из-за ослабления ледового покрова Северного Ледовитого океана, который препятствует возрастанию интенсивности приливных явлений.

В данном контексте особенно актуальным становится изучение гидролого-гидрохимических и гидробиологических процессов в устьях рек Чёшской и Индигской губ на востоке Баренцева моря, на стыке которых планируется постройка арктического глубоководного порта. Он способен оказать определенное негативное воздействие на водные экосистемы. Для минимизации подобного воздействия и разработки эффективных природоохранных мер необходимо знать фоновые природные условия рассматриваемого района. Для решения этой проблемы летом 2022 года были выполнены комплексные исследования устья реки Индига, которая впадает в вершину Индигской губы Баренцева моря.

Индига относится к так называемым средним рекам (площадь водосбора 3790 км²). При впадении в море река формирует воронкообразный эстуарий протяженностью около 30 км с наличием блокирующей косы. В него 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. В пределах эстуария располагаются поселки Индига и Выучейский, входящие в Заполярный район Ненецкого автономного округа.

Исследования эстуария р. Индиги и его боковых притоков (рек Большая Щелиха и Иевка), включая их пойменные озера, были выполнены в период с 21 июля по 1 августа 2022 года. Были проведены серии гидролого-гидрохимических полусуточных наблюдений на 3-х станциях с дискретностью 2 часа в зоне смешения речных и морских вод и 2 разреза на 6 станциях на полной воде прилива в устьях боковых притоков. Станция 1и располагалась на удалении 3 км от морской границы эстуария р. Индиги, станция 2и — на удалении 17 км и станция 3и — на удалении 26 км (рис. 1).

На разрезах в реках Большая Щелиха и Иевка первая станция располагалась на границе бокового притока с эстуарием, остальные станции были удалены друг от друга на 3 км вверх по течению. Около полусуточных станций на нижней границе приливной осушки были отобраны 3 пробы донных отложений для определения содержания тяжелых металлов. Около участков расположения полусуточных станций, а также в устьях рек Большая Щелиха и Иевка выполнены 17 геоботанических профилей и обследовано 48 геоботанических площадок вне этих профилей. Проведены орнитологические наблюдения на 5 маршрутах.

Колебания уровня 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.

Содержание взвеси определялось методом мембранной ультрафильтрации под вакуумом через чистые (обработанные 4 %-ной соляной кислотой и тщательно промытые бидистиллированной водой) ядерные фильтры (диаметр — 47 мм, диаметр пор — 0,45 мкм), изготовленные в Объединенном институте ядерных исследований в г. Дубне. Предварительное взвешивание ядерных фильтров осуществлялось на электронных лабораторных весах «Adventurer Pro» model RV214 фирмы «ОНАУС Europe». Для определения растворенной формы общего фосфора использовался метод предложенный Королёвым и уточнённый Вальдеррамом. Он основан на окислении фосфорсодержащих органических соединений до фосфатов.

Состояние экосистемы эстуария р. Индиги целесообразно рассмотреть в рамках модели маргинального фильтра, разработанной академиком Лисицыным А. П. [2]. В соответствии с ней в зоне смешения речных и морских вод при увеличении солености формируются три последовательные зоны — гравитационная ступень (мутяевая «пробка»), коагуляционно-сорбционная ступень и биологическая ступень. В первой зоне фиксируется наибольшая мутность устьевых вод, во второй зоне наблюдаются хорошо выраженные геохимические процессы, в третьей зоне отмечается значительное повышение биомассы планктона и других гидробионтов.

Например, в Белом море для устьевой области р. Северной Двины первой зоне соответствует диапазон солености 0,5–5 ‰, второй зоне — 5–20 ‰ и третьей зоне — соленость более 20 ‰ [3]. Следует отметить, что вышеуказанная модель хорошо отражает процессы, происходящие только в устьях больших рек. В приливных устьях малых рек арктической зоны России структура маргинального фильтра может иметь иной характер [4]. Для устьев средних рек ситуация в данном отношении остается малоизученной. Проведенные исследования позволяют сделать определенный шаг для решения указанной проблемы.

Зона смешения речных и морских вод в эстуарии р. Индиги летом в полную воду прилива занимает весь эстуарий на протяжении 30 км. Фронтальный раздел по солености устьевых вод локализуется на центральном участке эстуария около п. Индига (рис. 2, табл.1). Здесь полусуточная приливная изменчивость солености была максимальной и достигала 10 ‰. На морской границе эстуария она не превышала 2 ‰.

Из приведенных в таблице 1 статистических параметров видно, что фронтальная зона между речными и морскими водами локализуется на станции 2и примерно в центре эстуария, который располагается внутри коагуляционно-сорбционной ступени маргинального фильтра. Наблюдаемая на этой ступени седиментация взвесей влечет за собой аккумуляцию в донных (илистых) отложениях тяжелых металлов, ограничивая их поступление из реки в Индигскую губу Баренцева моря.

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
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
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
Максимальное значение	20,6	5,70	110,0	130,6	8,43	20,5
Минимальное значение	15,7	1,80	27,5	98,7	8,00	11,6
Количество наблюдений	7	7	7	7	7	7

Анализ графиков связи солёности с содержанием взвешенных веществ и гидрохимическими показателями показывает, что мутевой «пробке» в эстуарии р. Индиги соответствует интервал солёности менее 5 ‰, а коагуляционно-сорбционной ступени — 5–30 ‰. На участке максимальной мутности вод около вершины эстуария содержание взвеси достигало 86-110

мг/л. Наибольшие концентрации взвеси на входе в эстуарий наблюдались на малой воде приливного цикла, в центре эстуария — на половине фазы прилива и в вершине эстуария — на полной воде прилива.

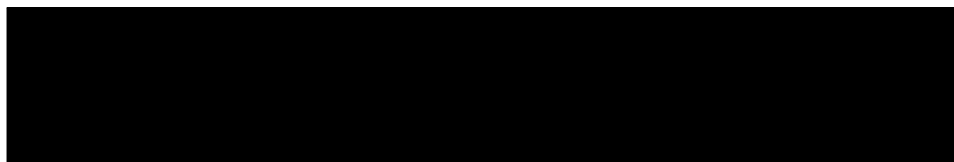
В устьях боковых притоков максимальное содержание взвеси в воде наблюдается на их границе с эстуарием на полной воде прилива, когда в них начинает проникать мутьевая «пробка» из основного водотока (табл. 2).

Коагуляционно-сорбционная ступень маргинального фильтра занимает основную часть пространства изучаемого эстуария. Здесь зафиксировано наличие нелинейных связей распределения солёности с исследуемыми параметрами, что указывает на активно идущие геохимические процессы. В диапазоне солёности 12–29 ‰ наблюдалось снижение величины pH с локальным минимумом до уровня 7,8–7,9, что, вероятно, обусловлено выпадением в осадок кальция при трансформации солевого состава эстуарных вод зон. В данной зоне также отмечалось заметное снижение насыщения эстуарных вод кислородом с минимумом (до 95 %) в том же диапазоне солёности, что и для величины pH. Такой эффект, возможно, является последствием ингибирующего влияния повышенной мутности эстуарных вод на фотосинтез микроводорослей. Для общего фосфора, наоборот, на 2-й ступени маргинального фильтра фиксировалось локальное возрастание концентраций в интервале солёности 10–20 ‰. Этот процесс, скорее всего, связан со стоком при отливе вод с лайд, сильно загрязнённых фекалиями водоплавающих и околоводных птиц.

Устье реки Большая Щелиха (26.08.2022 г.)							
1щ/и	14.15	16,4	19,2	25,4	10,54	108,6	7,94
2щ/и	14.35	16,5	15,4	21,2	10,15	104,2	7,86
3щ/и	14.55	16,4	4,8	15,4	10,46	107,6	7,95
Устье реки Илевки (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

Если ориентироваться на кислородонасыщение эстуарных вод, как на показатель интенсификации развития водной флоры, то можно предположить, что биологическая ступень маргинального фильтра, по всей вероятности, вытесняется в морские воды Индигской губы в зону с глубинами более 10 метров и с солёностью более 30 ‰. Образованию высокой биологической продуктивности эстуарных вод на интервале солёности менее 30 ‰ препятствует баровая отмель с глубинами 1–3 метра (на малой воде прилива) в южной части губы. При наличии ветрового волнения и сильных приливных течений здесь формируются неблагоприятные гидродинамические и литодинамические условия для развития морских гидробионтов и водорослей.

Относительное содержание кислорода на 2-й ступени маргинального фильтра вплоть до морской границы эстуария не превышает 100–102 %. В то же самое время в лагунных (пойменных) озерах на его лайдах (приморских лугах), заливаемых морской водой на приливах и где наблюдается обилие галофитной растительности, фиксируется высокое кислородонасыщение – 117–144 % (табл. 3). Следует заметить, что подобные биотопы создают благоприятные условия для обитания здесь широкого перечня водоплавающих и околоводных птиц и хищных представителей приморской орнитофауны.



Устье реки Большая Щелиха				
1о/и	19,9	9,7	13,62	143,7
2о/и	19,7	1,0	10,75	116,6
Устье реки Илевки				
3о/и	16,8	11,4	9,84	117,4

Для тяжелых металлов характерно накопление в илистых отложениях на 2-й ступени маргинального фильтра изучаемого эстуария (табл. 4). Локализация их максимума (за исключением цинка) приурочена к центру зоны смешения речных и морских вод, т. е. к участку расположения станции 2и (рис. 3).

Среди исследуемых металлов наибольшие концентрации были зафиксированы для марганца, вторую позицию в этом отношении занимает цинк, третью позицию – никель. Металлы, которые часто выступают в качестве индикаторов техногенного влияния (свинец и кадмий), в донных отложениях содержались в очень низких концентрациях. В целом, наблюдаемая по тяжелым металлам ситуация не выходит за рамки фоновой их изменчивости, типичной для прибрежной зоны юго-востока Баренцева моря.

Медь, мг/кг	5,8	7,3	5,9
Цинк, мг/кг	31	40	43
Свинец, мг/кг	3,8	4,9	3,9
Кадмий, мг/кг	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Никель, мг/кг	9,2	10,6	10,2
Марганец, мг/кг	62	83	73

Как уже ранее отмечалось, наличие сравнительно высокой величины прилива, формирует в устьевой области р. Индиги обширные приморские луга (лайды), куда на приливе и при штормовых нагонах поступают морские воды. Здесь создаются благоприятные условия для развития разнообразной галофитной растительности, которая в свою очередь, создает хорошие условия для обитания различных водных и околоводных птиц, включая охотящихся на них хищных представителей орнитофауны.

В ходе экспедиции в районе эстуария р. Индиги зафиксировано наличие свыше 100 видов приморских сосудистых растений, мхов и водорослей. Здесь проходит северная граница ареалов обитания некоторых видов галофитов и их сообществ. Так на северо-восточной границе ареала произрастают астра морская (*Trifolium rannonicum*), подорожник почтиполярный (*Plantago subpolaris*) и эндемичный для побережий Белого и Баренцева морей осот приземистый (*Sonchus humilis*). Однако наибольшие площади на лайдах занимают сообщества с доминированием осоки обертковидной (*Carex subspathacea*), осоки галечной (*Carex glareosa*), осоки Макензи (*Carex mackenziei*), осоки солелюбивой (*Carex salina*) и хвостника четырехлистного (*Hippuris tetraphylla*), что указывает на сходство приморской растительности эстуария Индиги с растительностью аккумулятивных берегов Печорской и Хайпудырской губ Баренцева моря. Из них осока Макензи и осока солелюбивая внесены в список видов нуждающихся в особом внимании к их состоянию в природной среде Красной книги Ненецкого автономного округа.

Видовой состав растительности пляжей и песчаных дюн эстуария слабо отличается от других районов юго-восточного побережья Баренцева моря. На них преобладают следующие растения: леймус песчаный (*Leymus arenarius*), хонкения бутерлаковидная (*Honckenya oblongifolia*), чина алеутская (*Lathyrus japonicus*) и осот приземистый (*Sonchus humilis*).

Согласно предварительным данным в устье р. Индиги было отмечено 3 вида растений, внесенных в Красную книгу Ненецкого автономного округа. Это лигустикум шотландский (*Ligusticum scoticum*), лебеда голостебельная (*Atriplex nudicaulis*) и скерда черноватая (*Crepis nigrescens*). Необходимо отметить, что лигустикум шотландский (*Ligusticum scoticum*), лебеда голостебельная (*Atriplex nudicaulis*), а также ситняг игольчатый (*Eleocharis uniglumis*) впервые обнаружены за пределами северо-восточной границы ранее известного ареала обитания.

На берегу Индигской губы на морской границе эстуария были проведены исследования водорослей макрофитов на видовой состав. В выбросах отмечены следующие виды промысловых бурых макроводорослей: ламинария сахарная (*Saccharina latissima*), ламинария пальчатая (*Laminaria digitata*), фукус двурядный (*Fucus distichus*) и фукус зубчатый (*Fucus serratus*). Непосредственно в эстуарии р. Индиги обычны зеленые водоросли, но наиболее обильна ульва (*Ulva prolifera*). В солоноватых озерах на водосборах рек Большая Щелиха и Иевка развиваются желто-зеленые водоросли рода вошерия (*Vaucheria*).

Из водоплавающих птиц в устьевой области р. Индиги наиболее часто встречаются серебристая чайка (*Larus argentatus*), полярная крачка (*Sterna paradisea*), морянка (*Clangula hyemalis*), свиязь (*Mareca penelope*) и кулик плавунчик (*Phalaropus*). На маршрутах также были отмечены большие крохали (*Mergus merganser*), стая синьги (*Melanitta nigra*) и короткохвостые поморники (*Srercorarius parasiticus*).

На блокирующей косе на входе в эстуарий у мыса Корга-Нос было зафиксировано гнездование полярной крачки из 50 особей и 8 особей внесенного в Красную книгу Ненецкого автономного округа кулика-сороки. Здесь также был отмечен орлан-белохвост. Это редкий и внесенный в Красную книгу России вид. Видимо вышеуказанная коса является его охотничьей территорией.

Результаты проведенных исследований можно использовать для оценки возможных последствий для экосистемы эстуария р. Индиги гипотетического аварийного разлива нефти на акватории проектируемого морского глубоководного порта [5] на границе между Индигской и Чёшской губами. В рассматриваемом районе квазистационарное течение идет вдоль морского побережья с запада на восток, что создает угрозу попадания аварийной нефти в эстуарий Индиги и, в конечном, счете, при отсутствии возможности оперативного устранения последствий аварии, приведет к его полному загрязнению.

Анализ биогеоценозов рассматриваемого устья реки, позволяет предположить, что эстуарные лайды являются ловушкой для взвесей, приносимых с моря при сизигийных приливах и штормовых нагонах. При этом аварийная нефть, сорбируясь на взвешях, будет затем аккумулироваться в зарослях галофитной растительности и в лагунных озерах, что повлечет за собой гибель водоплавающих и околоводных птиц, включая охраняемые виды. Также можно ожидать гибель морских млекопитающих, заходящих в эстуарий (белух, морских зайцев, нерпы) и нарушений миграции проходных и полупроходных видов рыбы (сёмги, горбуши, гольца, кумжи, нельмы и сига). С учетом этого в план природоохранных мероприятий проектируемого порта должны быть обязательно включены необходимые меры по сохранению устьев рек Индигской губы от нефтяного загрязнения. В частности, на ГМС Индига, расположенной в узком проливе на морской границе эстуария, следует держать средства (боны, сорбенты, надувные лодки и т. п.), которые можно оперативно задействовать для предотвращения попадания пятна нефти в устье р. Индиги.

Таким образом, следует предположить, что основной особенностью мезоприливных эстуариев западного сектора российской Арктики является формирование повышенной биологической продуктивности эстуарных вод на приморских заболоченных лугах (лайдах), где наблюдается высокое биоразнообразие галофитной растительности и орнитофауны. Эти эстуарные участки являются наиболее уязвимыми зонами по отношению к аварийным разливам нефти.

Финансирование

При проведении полевых исследований экосистемы эстуария р. Индиги использовались средства поддержки, выделенные Проектным офисом развития Арктики (ПОРА).

1. Михайлов В.Н. Принципы типизации и районирования устьевых областей рек (аналитический обзор) // Водные ресурсы. 2004. Том 31. № 1. С. 5–14.
2. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994.Т. 34. № 5. С. 735–747.
3. 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.

4. Мискевич И.В., Коробов В.Б., Мосеев Д.С. Специфика формирования маргинальных фильтров в приливных устьях рек арктических морей // *Океанология*. 2021. Том 61. № 1. С.141–146.

5. Перспективный порт Индига: зачем России новое «окно в Арктику» [Электронный ресурс]. <http://tehnovar.ru> (дата обращения: 07.08.2022).

1. Mikhailov V. N. Principles of typification and zoning of river estuarine regions (analytical review). *Water resources*. 2004. Tom 31. No. 1. P. 5–14. (in Russian).

2. Lisitsyn A.P. Oceans marginal filter // *Oceanology*. 1994 T. 34. No. 5. P. 735–747. (in Russian).

3. Shevchenko V.P., Filippov A.S., Novigatsky A.N., Gordeev V.V., Goryunova N.V., Demina L.L. Dispersed sedimentary matter of freshwater and sea ice // *System of the White Sea. T. II. Water column and the atmosphere interacting with it, cryosphere, river runoff and biosphere / Otv. ed. Lisitsyn A.P., ed. I.A. Nemirovskaya M.: Scientific world, 2012. P. 169–200 (in Russian).*

4. Miskevich I.V., Korobov V.B., Moseev D.S. Specifics of marginal filter in the tidel estuaries of small rives of the Arctic seas // *Oceanology*. 2021. T. 61. № 1. С. 127–131. (in Russian).

5. The promising port of Indiga: why does Russia need a new «window to the Arctic» [Electronic resource]. <http://tehnovar.ru> (date of access: 07.08.2022) (in Russian).