

УДК 551.465

ВОДООБМЕН МЕЖДУ ЛАГУНОЙ ПАТУС И АТЛАНТИЧЕСКИМ ОКЕАНОМ ЧЕРЕЗ УЗКИЙ ПРОЛИВ

© 2022 г. А. С. Гордей^{1, 2, *}, А. А. Осадчиев¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия*e-mail: aleksandra.gordey@phystech.edu

Поступила в редакцию 01.12.2020 г.

После доработки 25.05.2021 г.

Принята к публикации 19.08.2021 г.

Лагуна Патус расположена в Южной Бразилии и является крупнейшей по площади пресноводной лагуной мира. Патус соединяется узким проливом с Атлантическим океаном, через который происходит выток опресненных вод из лагуны в море и заток соленых морских вод в лагуну. На основе продолжительных рядов данных измерений на заякоренных станциях, гидрологических постах и данных реанализа ветра было изучено влияние региональных метеорологических и гидрологических условий на водообмен через этот пролив. Было установлено, что ярко выраженная сезонная изменчивость водообмена определяется в первую очередь сезонными колебаниями речного стока в лагуну и мало зависит от сезонной изменчивости региональной атмосферной циркуляции. Синоптические колебания водообмена через пролив на масштабах года также преимущественно зависят от синоптической изменчивости речного стока и мало связаны с колебаниями ветра. Скорость отклика водообмена на синоптическую изменчивость ветра составляет 24–48 ч в зависимости от интенсивности водообмена, предшествующего изменениям атмосферной циркуляции. Выток лагунных вод в море является характерным состоянием водообмена в период высокого стока, в то время как заток морских вод в лагуну в этот период является эпизодическим событием, вызванным специфическими ветровыми условиями. При сильных ветрах вдоль оси лагуны, направленных от пролива, формируется сгон вод лагуны у пролива и нагон в противоположной части лагуны. В результате этого морские воды затекают в лагуну. В период низкого стока характерны затоки морских вод в лагуну, а непродолжительные вытоки вызываются повышением речного расхода.

Ключевые слова: водообмен через пролив, речной плюм, материковый сток, ветровое воздействие, уровень моря, лагуна Патус, Атлантический океан

DOI: 10.31857/S0030157422020071

1. ВВЕДЕНИЕ

Эстуарий лагунного типа представляет собой речной эстуарий, соединенный узким проливом с морем. Из-за малой ширины пролива водообмен между эстуариями лагунного типа и морем затруднен. Несмотря на это, весь речной сток в эстуарий лагунного типа со временем поступает в море. Таким образом, эстуарии лагунного типа (как и любые другие эстуарии) являются гидрологическими системами, определяющими биопродуктивность, перенос терригенной взвеси и распространение естественных и антропогенных загрязнений в прилегающей прибрежной зоне. В то время как обычные эстуарии характеризуются относительно плавной изменчивостью интенсивности поступления опресненных вод в море, выток речных вод из эстуария лагунного типа является эпизодическим процессом. В силу этого исследование процессов водообмена между эсту-

ариями лагунного типа и морем представляет собой актуальную задачу, важную для понимания региональных прибрежных процессов.

Из-за ограниченности водообмена между эстуарными и морскими водами формируется резкий термохалинный градиент, что позволяет четко дифференцировать лагунные и океанические водные массы. Динамика водообмена между эстуарием лагунного типа и морем определяется несколькими факторами: морфологией эстуария и пролива, расходом впадающих в эстуарий рек, приливной циркуляцией, региональными ветровыми условиями и т.д. Эти внешние условия в различной степени влияют на водообмен. В частности, он может определяться главным образом как речным стоком, как в случае Амурского лимана [1], так и региональной атмосферной циркуляцией, как в случае поступления вод Азовского моря в Черное море через Керченский пролив [11].

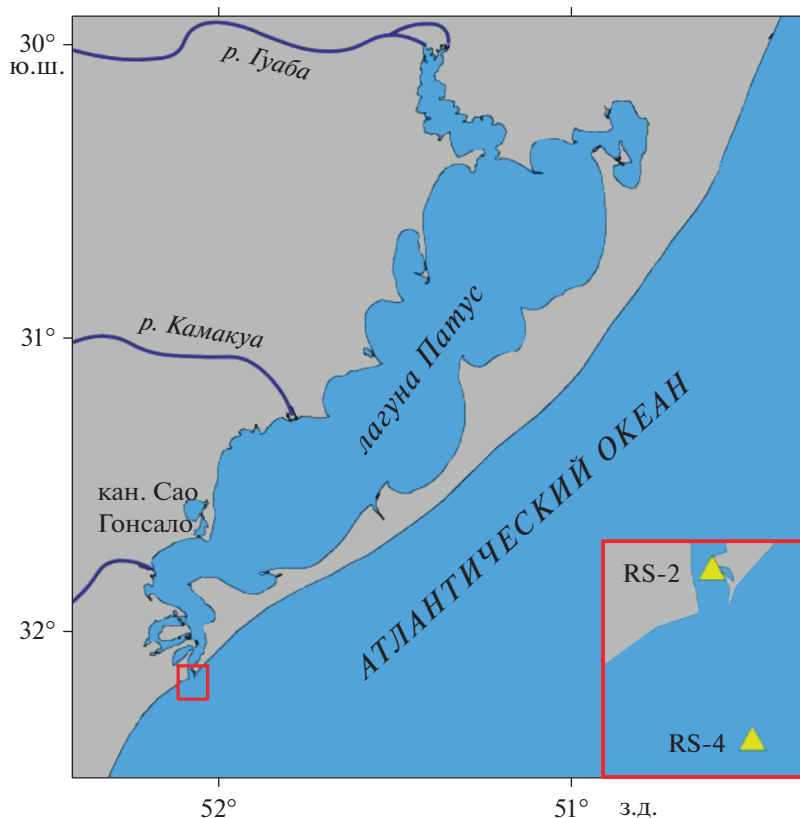


Рис. 1. Район исследований: лагуна Патус, реки Гуаба и Камакуа, канал Сао Гонсало. На вставке показано расположение буйковых станций SIMcosta RS-2, RS-4 (желтые треугольники) в районе пролива, соединяющего лагуна Патус и Атлантический океан.

Расположенная в Бразилии лагуна Патус (рис. 1) – крупнейшая лагуна в мире, чья площадь составляет 10 360 км², а глубина при этом не превышает 10 м при среднем значении 5 м. Лагуна имеет продолговатую форму: ее длина – 241 км, максимальная ширина – 48 км. Центральная ось лагуны расположена под углом 45 градусов к меридиану. Водобмен с Атлантическим океаном происходит через узкий (не более 1 км в ширину) пролив глубиной 12 м [1].

Объем речного расхода является важнейшим параметром, определяющим гидрофизические процессы в лагуне. Основные источники континентального стока для лагуны Патус – реки Камакуа и Гуаба; согласно [10], их среднегодовой расход равен 300 и 1500 м³/с соответственно. Помимо этого, пресные воды попадают в Патус из лагуны Лагоа-Мирин, соединяющейся с Патусом через канал Сао Гонсало. Этот приток приносит в Патус в среднем 700 м³/с в год [10]. Речной сток в лагуну имеет ярко выраженную сезонность. В летний сезон (октябрь–март) наблюдаются минимальные речные расходы, в зимний сезон (апрель–сентябрь) расход повышается в 2–3 раза из-за интенсивных осадков на водосборе лагуны Патус [9].

Для Патуса и прилегающей к нему шельфовой части Атлантического океана характерны несильные смешанные приливы с доминированием суточной гармоник. Амплитуда приливов не превышает 50 см [7]. Кроме того, приливные события фильтруются узким и извилистым проливом Патуса и потому оказывают существенное влияние лишь на устьевую часть лагуны. Как ветровой нагон, так и речной сток приводят к значительно большему локальному притоку вод, потому влияние приливов на водобмен между Патусом и Атлантическим океаном можно пренебречь. Это подтверждается измерениями солёности в проливе и прилегающей акватории Патуса: наблюдаемые колебания солёности не показывают никакой связи с периодом приливных колебаний.

Повышение уровня в лагуне приводит к вытоку опресненных вод через пролив в океан. Менее солёная и более теплая лагунная вода имеет меньшую плотность, чем океанические воды, и распространяется тонким (до 5 м [12]) слоем по поверхности океана. Этот опресненный поверхностный слой, образующийся в результате перемешивания лагунных и морских вод, можно рассматривать как плюм лагуны Патус. Плюм, формируемый периодическими вытоками из ла-

гуны, не является стационарным и постоянно существующим; напротив, он образуется лишь при определенных внешних условиях. В силу этого его гидрофизические характеристики и временная изменчивость заметно отличаются от гидрофизических характеристик и изменчивости плюмов, формируемых обычными эстуарными реками.

Пространственные размеры и гидрофизические характеристики плюма Патуса имеют значительную внутригодовую изменчивость, вызванную изменчивостью водообмена через пролив. Плюм Патуса достигает площади 1500 км² [3] и оказывает сильное влияние на прибрежные геохимические и биологические процессы, потому его исследованию было посвящено большое количество научных работ.

Ввиду благоприятных климатических условий для экспедиционных исследований многие работы по изучению плюма Патуса базируются на натурных измерениях. Так, в работе [13] был оценен пространственный масштаб плюма, а в [12] по измерениям, выполненным с помощью лидара [8], был изучен перенос и оседание терригенной взвеси, выносимой из лагуны в море. Большой объем собранных натурных данных в водоеме позволяет эффективно верифицировать численные модели плюма Патуса. Например, работа [5] посвящена моделированию переноса терригенных взвешенных частиц, а в работе [4] представлены результаты разработки численной модели изменчивости стратификации в прибрежной зоне Атлантического океана в районе формирования плюма Патуса.

В работе [6] была установлена сезонность динамики водообмена в проливе Патуса. Как было сказано выше, для зимнего сезона характерен высокий речной сток, определяющий вытоки лагунных вод [3]. В летний же сезон расход впадающих в Патус рек значительно ниже, и режим водообмена находится под сильным влиянием как речного стока, так и ветровых условий. Однако, помимо качественного обобщения наблюдений, не существует количественных оценок того, как речной сток и ветер влияют на интенсивность заток и вытоков.

Кроме того, в силу крупных масштабов лагуны и формируемого ее водами плюма для их изучения эффективны методы дистанционного зондирования, в частности, спутниковая съемка, благодаря которой могут быть восстановлены размеры плюма и динамика его распространения. Так, в [9] по данным спутниковой съемки было исследовано распределение взвешенного вещества в лагуне, сезонность его распределения, а также получены оценки влияния речного стока и ветра на концентрации взвешенного вещества. Однако полномасштабные спутниковые исследования

плюма Патуса к настоящему моменту не проводились.

Контактные измерения могут быть совмещены с дистанционными, как это сделано в [2], где по данным аэрофотосъемки и натурным данным было изучено взаимодействие плюмов Патуса и плюма Ла-Платы – крупнейшего плюма региона. Плюм Ла-Платы образуется в результате поступления стока крупных рек Парана (среднегодовой расход 17 500 м³/с) и Уругвай (5500 м³/с) в Атлантический океан примерно на 400 км южнее лагуны Патус и распространяется на сотни километров вдоль линии берега, оказывая влияние на распространение плюма Патуса.

В 2018 году в лагуне, в проливе и в прибрежной зоне в районе пролива было установлено несколько автономных заякоренных станций, регистрирующих различные гидрофизические и гидрохимические характеристики поверхностного слоя моря. Настоящая работа основана на анализе этих новых данных, которые позволили существенно уточнить существующие представления о водообмене между лагуной и морем. Кроме того, в этой работе была впервые по отдельности проанализирована синоптическая, среднемесячная и сезонная изменчивость водообмена. На основе этого анализа была установлена связь изменчивости водообмена и плюма с региональными внешними условиями.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования водообмена между лагуной Патус и Атлантическим океаном использовались данные измерений солёности с датчиков системы заякоренных станций SIMCosta, реанализ ветра NCER/NCAP и уровень рек по показаниям гидрологических постов системы гидрологического информирования Бразилии Agencia Nacional de Aguas (ANA). В рамках этой работы были проанализированы непрерывные ряды данных за февраль 2019 – май 2020 гг. с временной дискретностью 30 минут. Термохалинные характеристики рассматривались по данным двух заякоренных станций, расположенных в разных зонах области интенсивного водообмена. Станция RS-2 располагалась в проливе (32°8'4" ю.ш., 52°5'53" з.д.), а станция RS-4 находилась в океане мористее пролива в зоне распространения плюма Патуса (32°14'44" ю.ш., 52°5'44" з.д.). Расположение станций изображено на рис. 1.

Ветер на высоте 10 м над поверхностью океана был взят из реанализа NCER/NCAP с временной дискретностью 6 ч и усреднялся скользящим окном. Для каждого набора анализируемых данных период окна был выбран оптимальным образом, максимизирующим коэффициент корреляции между солёностью и внешними условиями. Для

исследования механизма заток были рассмотрены две различные проекции ветра — ориентированная вдоль пролива (пролегающего параллельно меридиану) и ориентированная вдоль оси лагуны Патус. Выбор первой проекции объясняется тем, что параллельный проливу ветер может препятствовать или способствовать затоку или вытоку вод через пролив. Вторая проекция позволяет исследовать влияние сгонно-нагонных явлений в лагуне на водообмен через пролив.

Данные уровня были получены с гидрологических постов в местах впадения рек Гуаба и Камакуа в Патус. С помощью подбора формулы $Q = aH^b$ по суточным данным уровня H были восстановлены суточные значения речного расхода Q . Коэффициенты a и b подбирались по данным среднемесячных расходов рек Гуаба и Камакуа, представленных в [10]. При этом минимизировалась функция $f(a, b) = \sum(Q_r - aH_r^b)^2$, где Q_r — среднемесячный расход по [10], H_r — среднемесячный уровень по натурным данным АНА. При подборе параметров учитывались данные речного уровня за период с 2009 по 2019 гг. Функция $f(a, b)$ минимизировалась методом дифференциальной эволюции. Выбор алгоритма оптимизации базировался на негладкости функции $f(a, b)$. Для реки Гуаба подобранные таким образом коэффициенты параболической аппроксимации равны $a = 229.8$, $b = 0.43$, для реки Камакуа — $a = 182.8$, $b = 0.28$. Рассчитанные данные речного расхода, аналогично скорости ветра, были усреднены с помощью скользящего окна фиксированного оптимального размера.

Анализ синоптических колебаний солёности был проведен по данным со станции RS-2, так как на этой станции ряд непрерывных измерений был наиболее продолжительным. В этой работе за опресненные лагунные воды принимались воды с солёностью < 10 епс, за солёные морские воды — воды с солёностью > 20 епс. Таким образом, выток лагунных вод в море определялся как монотонный спад солёности в проливе со значений более 20 епс до значений менее 10 епс. Аналогично заток морских вод в лагуну определялся как монотонный рост солёности в проливе со значений менее 10 епс до значений более 20 епс.

Для исследования причин сезонных колебаний водообмена были рассчитаны коэффициенты множественной корреляции между солёностью с одной стороны и скоростью ветра и речным расходом с другой стороны. Коэффициент множественной корреляции показывает, какая доля дисперсии солёности складывается из дисперсии ветра и дисперсии речного расхода.

Так как и речной расход, и солёность в проливе обладают ярко выраженной сезонностью, при анализе влияния внешних условий на водообмен на синоптическом временном масштабе данные

были разбиты на характерные сезоны. Механизм водообмена в каждый из сезонов изучался отдельно. Для каждого сезона зависимость солёности в проливе от ветра и речного расхода аппроксимировалась линейной регрессией, которая была рассчитана с помощью метода наименьших квадратов. Таким образом, аналитическое приближение солёности имеет вид: $S = a_1v + a_2u + bq + c$, где v, u — нормированные скорости ветра в различных проекциях; q — нормированный речной расход; a_1, a_2, b, c — коэффициенты линейной регрессии. Нормировка здесь — это деление на максимальное значение ряда, приводящее ряды данных в единый диапазон $[0, 1]$. Нормировать уровень рек и скорость ветра необходимо для того, чтобы нивелировать искажение коэффициентов линейной регрессии за счет разного разброса величин.

Коэффициенты a_1, a_2, b представляют собой количественные показатели силы влияния соответствующих параметров на солёность в проливе. Константа c соответствует значению солёности при динамическом равновесии в проливе в отсутствие внешнего воздействия. Так как эта величина не дает информации о факторах водообмена, она не будет анализироваться. Подбором этих коэффициентов максимизируется точность параметризации солёности, а метрикой точности этого приближения является множественная корреляция. Это позволило впервые количественно определить значимость ветровых условий и речного расхода в формировании водообмена между Патусом и Атлантическим океаном. Также было рассчитано время отклика водообмена в проливе на изменения речного расхода и ветровых условий. Оно определялось как временной сдвиг между рядами данных внешних условий относительно ряда данных солёности, при котором достигался максимальный коэффициент множественной корреляции.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Изменчивость водообмена в проливе на масштабах года

Речной расход в исследуемый период изменялся от 2690 м³/с в марте до 4100 м³/с в ноябре. Несмотря на то, что сезон высокого стока рек региона приходится на апрель–сентябрь, а сезон низкого — на октябрь–март [9], в 2019 году наблюдался аномальный пик речного расхода в ноябре (рис. 2). В частности, максимум речного расхода в ноябре (4100 м³/с) существенно превышал максимумы в мае и августе (3700 м³/с). По этой причине сезоном высокого стока в 2019–2020 гг. считался период с мая по ноябрь, а сезоном низкого стока — с декабря по апрель.

Ветер вдоль лагуны за период наблюдений изменялся от -27.6 до 38.7 м/с. Положительным

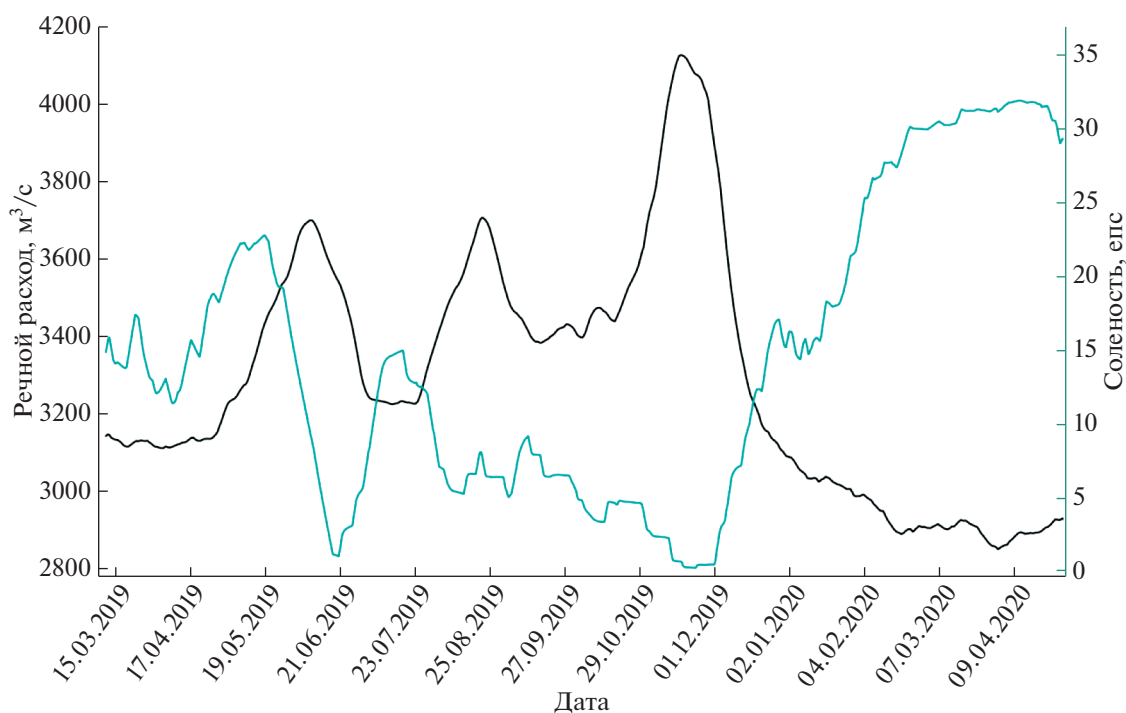


Рис. 2. График усредненных скользящим окном за месяц значений солёности (епс) на станции RS-2 и суммы расхода ($\text{м}^3/\text{с}$) рек Гуабы и Камакуа в лагуну Патус.

принято направление от пролива в сторону устья Гуабы (рис. 1). Ветер, направленный к берегу, достигает значений от -30.7 до 30 м/с. График среднемесячной абсолютной скорости ветра представлен на рис. 3. В период с февраля 2019 по май 2020 гг. атмосферная циркуляция не имела ярко выраженной сезонности.

Станция RS-2 работала непрерывно с февраля 2019 года по май 2020 гг. Станция RS-4 была расположена в океане на расстоянии 12 км от пролива и регистрировала интенсивные вытоки, когда формировался большой по площади речной плюм. Данные измерений солёности на станциях за период их одновременной работы с марта 2019 по октябрь 2020 гг. приведены на рис. 4. Сезонные колебания водообмена были оценены по колебаниям солёности на станции RS-2, установленной в проливе. По ее данным, солёность в проливе изменялась от 0.1 епс во время вытока лагунных вод до 33.8 епс во время залива морских вод. Минимальное значение среднемесячной солёности наблюдалось в ноябре и составляло

0.4 епс, что связано с максимумом речного стока в этот месяц. Максимальное значение средней солёности в 24.0 епс достигается в апреле. На рисунке 2 показан ход солёности и речного расхода, усредненных скользящим окном с периодом в месяц. Минимумы солёности достигаются в июне 2019 г. (менее 2 епс) и ноябре 2019 г. (менее 1 епс) и совпадают с пиками речного расхода. При этом пик расхода в августе 2019 г. не сопровождался резким падением солёности.

Для анализа корреляции между солёностью и внешними условиями на сезонном масштабе ряды данных были усреднены скользящим окном с периодом в один месяц. Результаты статистического анализа представлены в таблице 1. По данным станции RS-2, месячные колебания речного расхода и ветровых условий в течение года коррелируют с месячными колебаниями солёности в проливе с коэффициентом 0.86. При этом коэффициент корреляции Пирсона между колебаниями солёности и речного расхода составил 0.85, а между колебаниями солёности и ветра — 0.33.

Таблица 1. Коэффициенты регрессии месячных колебаний солёности на станциях RS-2 и RS-4 с внешними условиями

Станция	Речной расход	Южный ветер	Западный ветер	Коэффициент множественной корреляции
RS-2	-4.97	0.10	0.03	0.86
RS-4	-1.37	0.02	0.0	0.91

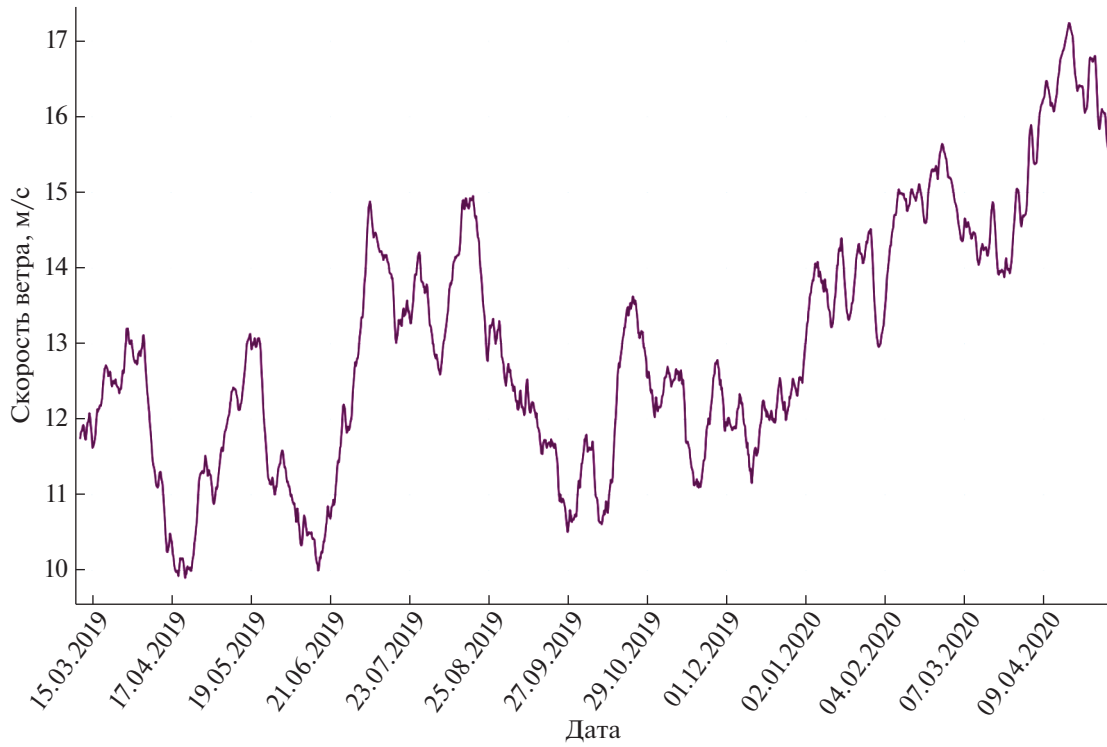


Рис. 3. График среднемесячной скорости ветра (абсолютные значения, м/с) в исследуемом регионе.

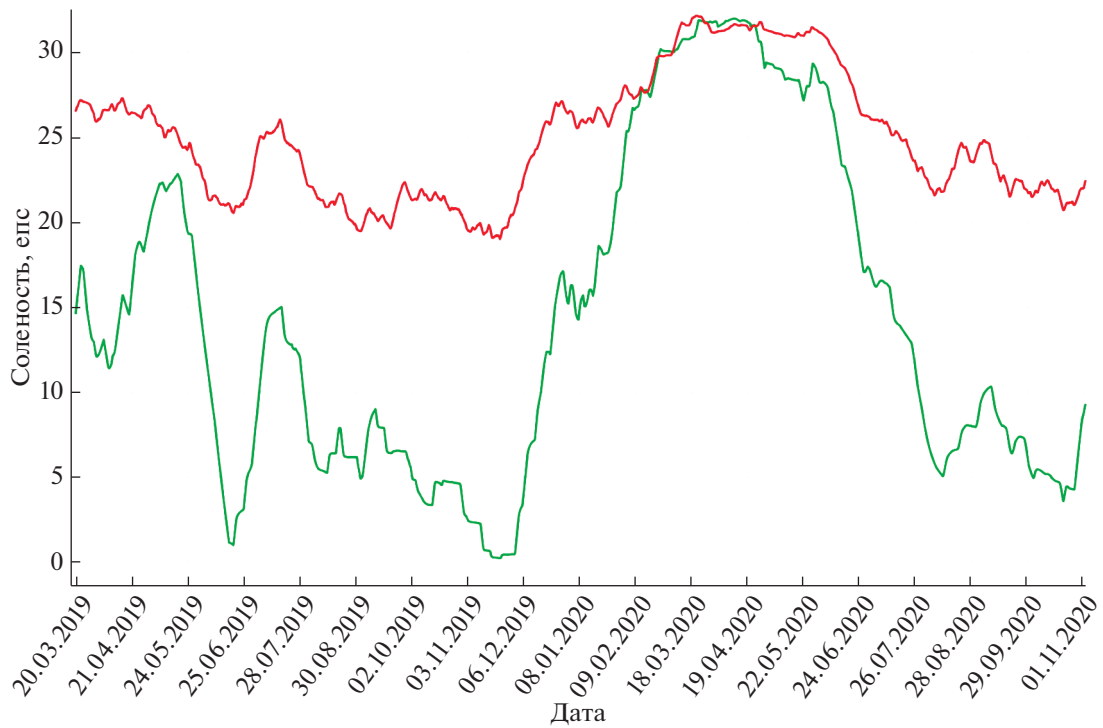


Рис. 4. График солености (eps) на станциях RS-2 (зеленый) и RS-4 (красный) с марта 2019 по ноябрь 2020 гг.

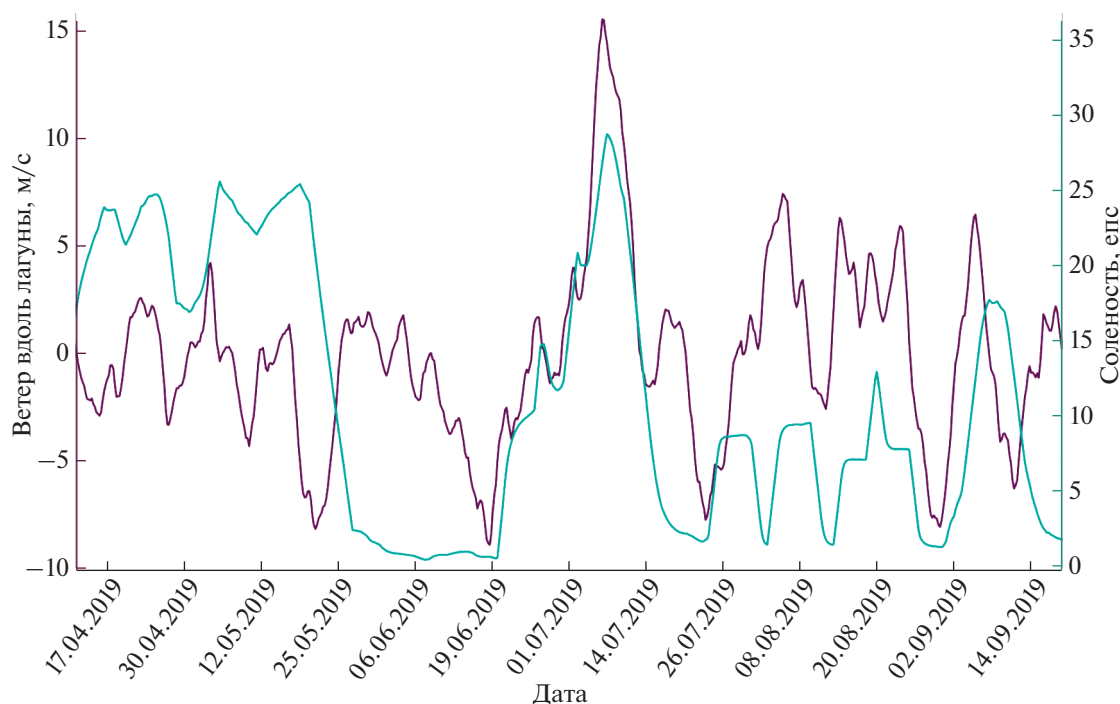


Рис. 5. График усредненных скользящим окном за неделю значений солёности (епс) на станции RS-2 и скорости ветра в исследуемом регионе с апреля по сентябрь 2019 г.

Максимальное значение усредненного скользящим окном шириной в месяц речного расхода за период всего года, на которое нормировался весь ряд речного расхода, составило $3896 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальные значения усредненного скользящим окном с периодом в месяц западного и южного ветра, использованные при их нормировке, достигли соответственно 5 и 3 м/с. Для солёности нормировочный коэффициент составил 32 епс.

Для ветровых условий над Патусом характерна синоптическая изменчивость, при этом нет четко выраженной сезонной изменчивости. Поэтому усредненная за месяц изменчивость ветра слабо связана с аналогично усредненными колебаниями солёности в проливе: коэффициенты регрессии для этих параметров равны 0.10 для южного ветра и 0.03 для западного. Вместе с тем, на графике усредненной за месяц изменчивости солёности и скорости ветра вдоль лагуны (рис. 5) виден совпадающий пик в июле 2019. Это говорит о том, что в некоторых случаях ветровые условия

являются причиной формирования затоков. Основным же параметром, определяющим водообмен между Патусом и Атлантическим океаном на сезонном масштабе, является пресноводный сток в лагуну. Коэффициент регрессии при нем составил -4.97 . Таким образом, изменчивость солёности в проливе на масштабах более месяца почти полностью обусловлена изменчивостью речного расхода. Выявленная зависимость видна и на графике изменчивости усредненных с периодом в один месяц солёности и речного расхода (рис. 2).

На расположенной в океане станции RS-4 коэффициент корреляции усредненной солёности с внешними условиями (речной расход и ветер) составил 0.91. Аналогично на станции RS-2 отсутствие корреляции между солёностью в море и ветровыми условиями (регрессионные коэффициенты для них близки к 0) связано с невыраженной сезонной изменчивостью ветра. Регрессионный коэффициент при речном стоке равен -1.37 , т.е. практически вся множественная корреляция обу-

Таблица 2. Коэффициенты регрессии синоптических колебаний солёности на станциях RS-2 и RS-4 с внешними условиями

Станция	Речной расход	Южный ветер	Западный ветер	Коэффициент множественной корреляции
RS-2	-0.36	0.21	0.03	0.35
RS-4	0.01	0.0	0.0	0.68

словлена только речным расходом, но не региональной атмосферной циркуляцией. Таким образом, соленость в океане на расстоянии 12 км от пролива на сезонном масштабе высоко коррелирует с речным расходом. Это подтверждается тем, что коэффициент корреляции Пирсона солёности с речным расходом составляет 0.90, а с ветром — 0.28. По-видимому, причина — в том, что стабильный речной плюм в прибрежном районе, который регистрируется на станции RS-4, формируют лишь интенсивные и продолжительные вытоки лагунных вод в океан. Они, в свою очередь, вызваны интенсивным речным стоком в лагуну. При этом атмосферная циркуляция существенно влияет на дальнейшее распространение плюма в открытом море [12, 13].

Синоптическая изменчивость ветра, солёности и речного расхода была получена вычитанием из исходных рядов данных их значений, усреднённых скользящим окном с шириной в 30 дней. Нормировочное значение для речного расхода составило 588 м³/с, для западного ветра — 22.5 м/с, для южного — 17 м/с, а для солёности — 29 епс. На станции RS-2 не обнаружено корреляции между синоптическими колебаниями солёности в проливе и изменчивостью внешних условий: множественная корреляция составила 0.35. При этом коэффициенты линейной регрессии сопоставимы по модулю при речном стоке (–0.36) и южном ветре (0.21). Такой низкий коэффициент множественной корреляции может свидетельствовать о том, что влияние факторов формирования водообмена неодинаково в течение года. Более точная оценка этих сезонных различий была получена при отдельном рассмотрении влияния ветрового воздействия и речного стока на вытоки и затоки в течение сезонов высокого и низкого стоков.

На станции RS-4 на синоптических временных масштабах значительная (0.68) корреляция солёности с речным расходом сопровождается нулевыми коэффициентами регрессии при речном расходе и скоростях ветра. Эти низкие коэффициенты означают, что изменчивость солёности на этой станции почти не связана с изменчивостью ветра и стока. Вкупе с выраженной корреляцией это говорит о том, что дисперсия солёности на RS-4 на синоптических масштабах очень мала. То есть показания на станции RS-4 мало изменяются на синоптических временных масштабах. По-видимому, это объясняется двумя факторами. С одной стороны, станция расположена слишком далеко от пролива, чтобы регистрировать тонкие изменения водообмена. С другой, распространение речного плюма в прибрежной зоне моря в периоды повышенного речного расхода имеет сильную инерционность.

3.2. Изменчивость водообмена в проливе в сезоны интенсивного и слабого речного стока в лагуну

Для исследования синоптической изменчивости водообмена между океаном и Патусом данные, полученные в проливе, были разделены на два сезона. Разделение на сезоны было сделано по сезонному ходу речного расхода, потому как атмосферная циркуляция не имеет явно выраженной сезонности, а сезонность солёности в основном объясняется сезонностью речного расхода. Так, в сезон интенсивного речного стока (май–ноябрь) средняя солёность на станции RS-2 составила 7.6 епс, в сезон слабого (декабрь–апрель) — 22.6 епс. Показательная гистограмма суммарного расхода рек, впадающих в Патус, представленная на рис. 6, на которой проиллюстрировано, что средний общий расход, его экстремальные значения и его дисперсия намного выше в период высокого стока, чем низкого.

Сезонность солёности определялась по показаниям станции RS-2. Время реакции солёности на колебания речного расхода оказалось затруднительно оценить по графику солёности и уровня рек (рис. 7, для наглядности рисунок выбран промежуток времени с мая по декабрь 2019 г.). Предположительно это вызвано сложностью формирования водообмена между лагуной и океаном, не исчерпывающегося колебаниями речного расхода.

В период высокого стока в Патус с апреля по ноябрь на станции RS-2, расположенной в проливе, обнаружена слабая корреляция между солёностью и внешними условиями (0.55). Оптимальное усреднение для ветра составило 48 ч, для речного расхода — 96 ч. Подобранное методом максимизации корреляции время реакции водообмена на колебания уровня рек составило около 2 суток. Нормировочный коэффициент в период интенсивного речного стока в Патус для речного расхода оказался равен 4323 м³/с, около 30 м/с — для скорости ветра вдоль оси Патуса и перпендикулярно ей, около 15 м/с — для южного и западного ветров и 31 епс — для солёности.

В период интенсивного стока в Патус коэффициент линейной регрессии по абсолютному значению выше всего при речном расходе (–1.32). При этом коэффициенты линейной регрессии для зональной и меридиональной компонент ветра (табл. 3), а, значит, и их роль в формировании режима водообмена близки между собой (0.22 для южного ветра и 0.34 для западного). Однако в проекции на систему координат, ориентированной относительно оси лагуны, коэффициенты ветровых компонент линейной регрессии отличаются гораздо больше (табл. 4). В этой проекции в сезон интенсивного речного стока коэффициент линейной регрессии для вдольлагунного ветра (0.46) в 20 раз больше коэффициента для попе-

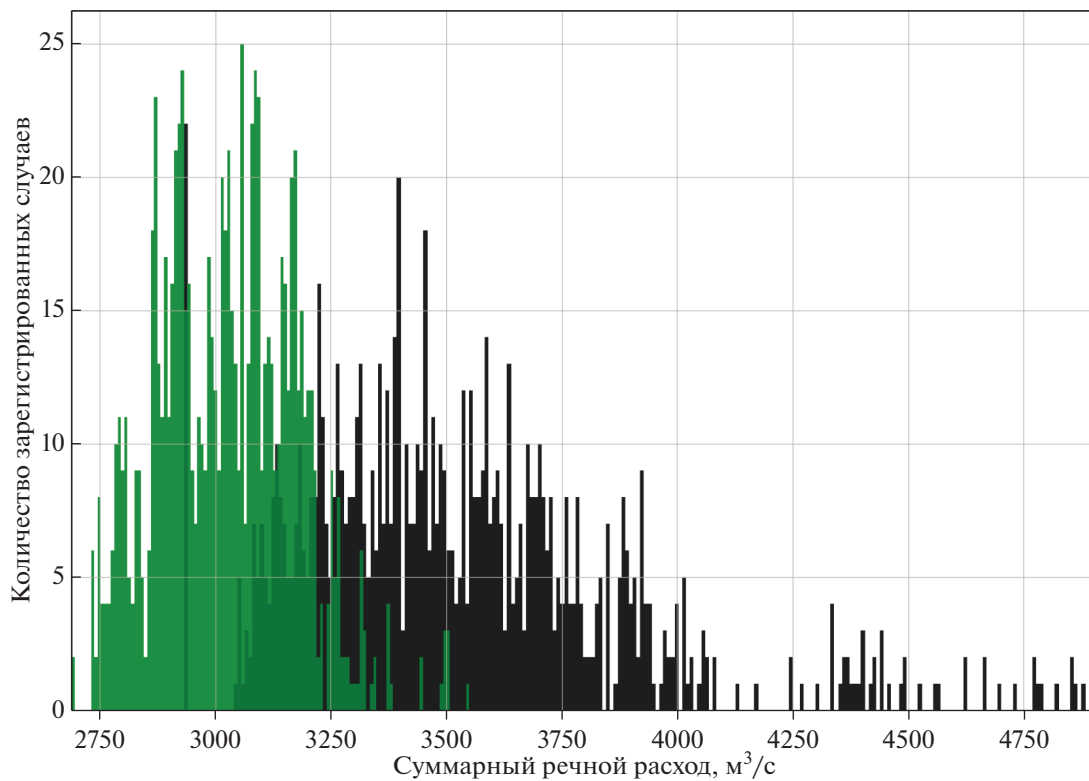


Рис. 6. Гистограмма суммы расхода рек Гуабы и Камакуа в лагуну Патус для сезонов низкого (зеленый) и высокого (черный) речного расхода.

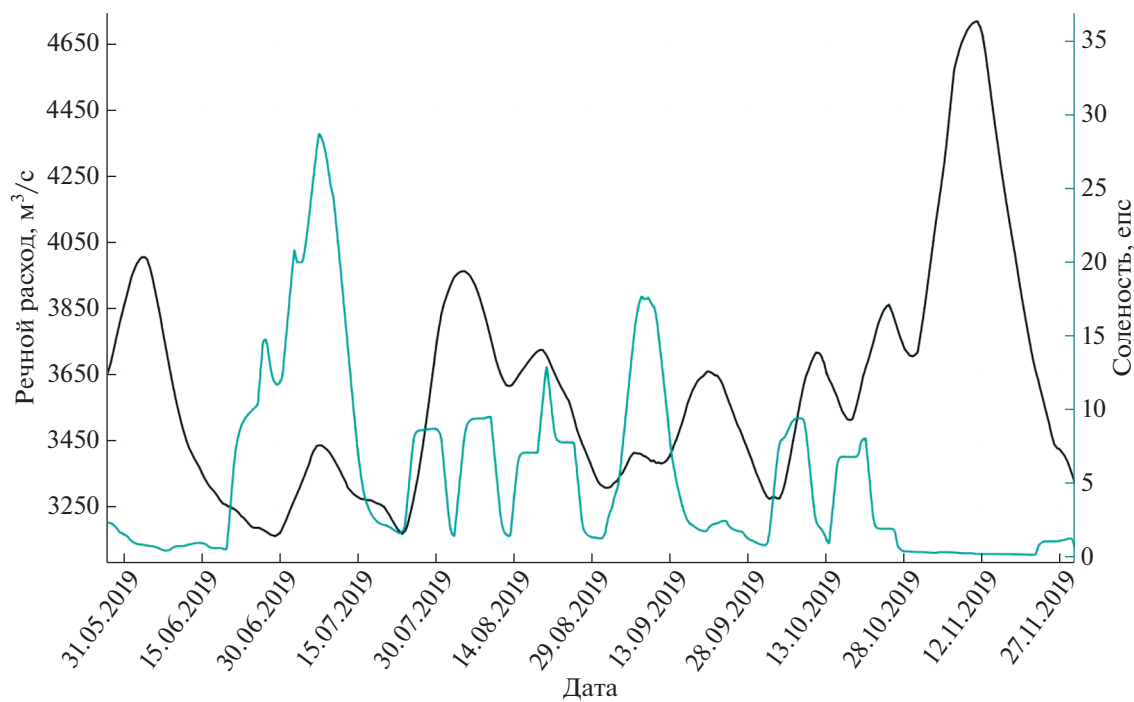


Рис. 7. График солёности (епс) на станции RS-2 и суммы расхода рек Гуабы и Камакуа (м³/с) в лагуну Патус с июня по август 2019 г.

Таблица 3. Коэффициенты регрессии синоптических колебаний солености на станции RS-2 в зависимости от интенсивности стока, проекция ветра Меркатора

Сток в лагуну	Речной расход	Южный ветер	Западный ветер	Коэффициент множественной корреляции
Сильный	-1.32	0.22	0.34	0.55
Слабый	-5.27	0.22	0.08	0.68

Таблица 4. Коэффициенты регрессии синоптических колебаний солености на станции RS-2 в зависимости от интенсивности стока, проекция ветра на ось лагуны

Сток в лагуну	Речной расход	Ветер вдоль лагуны	Ветер поперек лагуны	Коэффициент множественной корреляции
Сильный	-1.32	0.46	0.02	0.55
Слабый	-5.27	0.27	0.14	0.68

речного к ней ветра (0.02). Следовательно, именно вдольлагунный ветер влияет на изменчивость водообмена между Патусом и океаном. Ветер в этом направлении приводит к нагону вод лагуны в ее устье, из-за чего понижается уровень в эстуарии и создается баротропный градиент из океана в лагуну. Таким образом, обнаружен характерный для Патуса в сезон интенсивного стока механизм морских затоков.

Для периода высокого стока соленость аппроксимируется формулой $S = 0.02u_{across} + 0.46u_{along} - 1.36q + C_1$, где u_{across} , u_{along} – скорости ветра поперек и вдоль лагуны, q – речной расход, C_1 – константа (табл. 4). При этом коэффициент линейной регрессии при речном стоке выше коэффициента при вдольлагунном ветре в 3 раза. В этом случае атмосферные условия имеют меньшее, но сопоставимое с речным расходом влияние на изменчивость водообмена лагуны с океаном. Рассчитано, что 73% данных солености, зафиксированных станцией RS-2 в период высокого стока, не достигают значения 10 епс, то есть свидетельствуют о лагунных водах в проливе. В таком случае предполагается, что в сезон высокого стока типичен выток из Патуса в океан, а затоки морских вод происходят в условиях временного ослабления речного стока благодаря вызванному ветровым стоном оттоку пресных вод Патуса от пролива к устью реки Гуабы.

Итак, в сезон высокого стока режим водообмена между Патусом и океаном обусловлен преимущественно изменчивостью речного расхода, но изменчивость вдольлагунного ветра также играет значимую роль в формировании водообмена. Эти результаты представляют собой важное уточнение существовавших ранее представлений о сезонном гидрологическом режиме лагуны Патус, который считался определяемым объемом поступающих пресных вод в период высокого речного расхода [9].

С декабря по апрель интенсивность речного стока снижается. Для рядов данных, собранных в этот период, коэффициент множественной корреляции солености на заякоренной станции с ветровыми условиями и уровнем составляет 0.68. Оптимальное усреднение ветра составило 48 часа, уровня – 96 часов. Нормировочное значение для речного расхода составило 3427 м³/с, для ветра вдоль оси лагуны Патус и поперечного к ней – 39 и 28 м/с соответственно, для южного и западного ветров – около 17 м/с, для солености – 34 епс. В сезон низкого стока изменчивость водообмена почти полностью определяется колебаниями речного стока: регрессионный коэффициент при речном расходе составил -5.27. Это в 20 раз больше, чем коэффициенты регрессии при ветре. В сравнении с этим результатом коэффициент регрессии для ветра вдоль лагуны (0.14) несильно отличается от коэффициента при поперечном к ней ветре (0.27). То же справедливо и для коэффициентов регрессии при южном (0.22) и при западном (0.08) ветрах.

Получено следующее уравнение линейной регрессии для солености в период низкого стока: $S = 0.27u_{across} + 0.14u_{along} - 5.27q + C_2$, где C_2 – константа (табл. 3). Этот результат свидетельствует о ключевой роли колебаний речного расхода в формировании изменчивости водообмена между Патусом и Атлантическим океаном в сезон низкого стока.

Полученный вывод о ключевом влиянии речного расхода на водообмен Патуса и океана в сезон низкого речного стока позволяет разработать качественную модель этого процесса в летний сезон. По ряду солености на станции RS-2 было установлено, что 65% времени в период низкого стока пролив занят морскими водами (соленость > 20 епс). Таким образом, для этого периода типичны морские затоки, и, так как речной сток в это время невелик, ветровой стгон из лагуны или, напротив, ветровой нагон океанских вод не ока-

зывает заметного влияния на водообмен. Однако причиной вытока может стать резкое увеличение речного стока, которое формирует баротропный градиент давления из лагуны в открытое море. Таким образом, механизм затоков и вытоков в сезон низкого стока отличается от механизма затоков и вытоков в период высокого стока рек в Патус. Если в первом случае вытоки происходят редко, в условиях эпизодического усиления речного расхода, то во втором вытоки лагунных вод – постоянное состояние системы, которое нарушается при ветровом сгоне вод лагуны к ее удаленной от пролива части.

Итак, даже в сезон низкого стока речной расход оказывается гораздо значимее ветра (в 20 раз). Таким образом, точная статистическая обработка натуральных данных за 2019 год опровергает результаты работы [9] о формировании ветром динамики водообмена лагуны Патус и океана в летний сезон.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена оценке влияния внешних условий на водообмен между лагуной Патус и Атлантическим океаном на различных временных масштабах, причем описанная в ней методология может быть применена и к другим лагунам эстуарного типа.

Установлено, что сезонные колебания водообмена в период с февраля 2019 по май 2020 гг. обусловлены колебаниями речного расхода и практически не зависят от сезонных колебаний атмосферной циркуляции. Синоптические колебания водообмена между Патусом и Атлантическим океаном в период как слабого, так и интенсивного стока в Патус также в большей степени зависят от синоптической изменчивости речного расхода, чем от синоптической изменчивости ветра. При этом синоптическая изменчивость ветра и расхода слабо коррелирует с колебаниями солености в проливе (а, следовательно, и с интенсивностью водообмена) на масштабах целого года.

Впервые детально изучена синоптическая изменчивость водообмена между Патусом и Атлантическим океаном, причем отдельно для сезонов низкого и высокого речного стока. Значительно расширены существовавшие ранее представления о том, что в период высокого стока ключевую роль в формировании водообмена играет только речной сток, а в период низкого стока – только атмосферная циркуляция [9]. По данным за 2019–2020 гг., в период низкого стока основное влияние на водообмен оказывает поступление пресных вод из рек в лагуны, при этом ветровые условия оказываются незначимыми. В период высокого стока, действительно, поступление речных вод в лагуны играет главную роль в формиро-

вании водообмена, однако атмосферная циркуляция также играет существенную роль в этом процессе.

На основе полученных результатов установлены основные механизмы, определяющие водообмен между Патусом и Атлантическим океаном. В сезон высокого стока происходит практически постоянный выток из лагуны в океан. Интенсивность вытоков зависит в большей степени от объема речного стока, поступающего в лагуны, и в меньшей – от скорости вдольлагунной компоненты ветра. Затоки морских вод в лагуны в период высокого стока происходят в результате сгона вод лагуны вдольлагунным ветром от пролива в сторону материка, что приводит к понижению уровня в лагуне в районе пролива.

В сезон низкого стока происходит практически постоянный заток морских вод в лагуны, при этом региональная атмосферная циркуляция не оказывает значимого влияния на интенсивность водообмена. Эпизодические вытоки вод из лагуны в океан формируются в результате краткосрочного повышения речного расхода в лагуны, вызываемого, по-видимому, дождевыми паводками.

Источники финансирования: Работа выполнена при поддержке Министерства Науки и Высшего Образования РФ, тема 0149-2019-0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осадчиев А.* Распространение плюма реки Амур в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 3. С. 417–424.
2. *Burrage D., Wessona J., Martinez C. et al.* Patos Lagoon outflow within the Rio de la Plata plume using an airborne salinity mapper: observing an embedded plume // *Continental Shelf Research*. 2008. № 28. P. 1625–1638.
3. *Fernandes E., Dyera K., Molle O. et al.* The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Nino event (1998) // *Continental Shelf Research*. 2002. № 22. P. 1699–1713.
4. *Marques W., Fernandes E., Monteiro I. et al.* Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume // *Continental Shelf Research*. 2009. № 29. P. 556–571.
5. *Marques W., Fernandes E., Moraes B., et al.* Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the South Brazilian inner shelf // *Journal of Geophysical Research*. 2010. V. 115. C10045. P. 1–22.
6. *Moller O., Castaing P., Salomon J.-C. et al.* The Influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon // *Estuarine Research Federation*. 2001. № 24. P. 297–311.
7. *Monteiro I., Marques W., Fernandes E. et al.* On the effect of earth rotation, river discharge, tidal oscillations, and wind in the dynamics of the Patos Lagoon coastal plume // *Journal of Coastal Research*. 2011. V. 27. № 1. P. 120–130.

8. *Palmer S., Pelevin V., Goncharenko I. et al.* Ultraviolet fluorescence LiDAR (UFL) as a measurement tool for water quality parameters in turbid lake conditions // *Remote Sensing*. 2013. № 5. P. 4405–4422.
9. *Tavora J., Fernandes E., Thomas A, et al.* The influence of river discharge and wind on Patos Lagoon, Brazil, suspended particulate matter // *International Journal of Remote Sensing*. 2019. V. 40. P. 4506–4525.
10. *Vaz A., Möller Jr., Almeida T.* Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos // *Atlântica*. 2006. № 28. P. 13–23.
11. *Zavialov I., Osadchiev A., Sedakov R. et al.* Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea through the Kerch Strait // *Ocean Science*. 2020. V. 16. P. 15–30.
12. *Zavialov P., Pelevin V., Belyaev N. et al.* High resolution lidar measurements reveal fine internal structure and variability of sediment-carrying coastal plume // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2018. V. 205. P. 40–45.
13. *Zavialov P., Kostianoy A., Moller Jr.* SAFARI cruise: mapping river discharge effects on Southern Brazilian shelf // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. № 21. P. 2126–2130.

Water Exchange Between the Patos Lagoon and the Atlantic Ocean Through the Narrow Strait

A. A. Gordey^{a, b, #}, A. S. Osadchiev^a

^a*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Moscow, Russia*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

[#]*e-mail: aleksandra.gordey@phystech.edu*

The Patos Lagoon is located in the Southern Brazil and is the largest freshwater lagoon in the World. The Patos is connected with the Atlantic Ocean by a narrow strait. Through this strait the inflows of saline waters from the sea to the lagoon and outflows of fresh waters from the lagoon to the sea occur. Based on long-term in situ data from sea mooring and river gauge stations, as well as wind reanalysis data, the influence of local meteorological and hydrological conditions on water exchange through this strait was studied. It was revealed that the distinct seasonal variability of water exchange is defined mostly by the seasonal river discharge variability, while the variability of local atmospheric circulation does not influence it. Similarly, the synoptical variability of water exchange between the Patos Lagoon and the Atlantic Ocean on annual scale depends mostly on the variability of river runoff and shows little relation with synoptical wind forcing variability. The water exchange responds to the synoptic wind forcing variability in 24–48 hours depending on intensity of water exchange preceding the change of atmospheric circulation. Outflows of lagoon waters to the sea are typical during the high river discharge period, while inflows of sea waters to the lagoon are rare and occur under specific wind conditions. Under strong wind, blowing along the Patos from the strait to the continent, negative surge of the lagoon waters near the strait and positive surge at the opposite side of the lagoon are formed. As a result, the sea waters inflows to the lagoon. During the low river discharge periods inflows of sea waters to the lagoon are typical, while short-term outflows are induced by the increase of river discharge.

Keywords: water exchange through the strait, river plume, continental runoff, wind forcing, sea level, Patos Lagoon, Atlantic Ocean