

## ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ВОД В ЗОНЕ АПВЕЛЛИНГА У ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ О. САХАЛИН

Г. В. Шевченко<sup>1,2</sup>, В. Е. Марыжихин<sup>1</sup>, В. Н. Частиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института  
Рыбного хозяйства и океанографии,*

*Россия, 693023, Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, 196,  
e-mail: shevchenko\_zhora@mail.ru; jonur.27@mail.ru; v.chastikov@sakhniro.ru;*

<sup>2</sup>*Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения  
Российской академии наук,*

*Россия, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б*

На основе пространственных распределений температуры поверхности моря по спутниковым наблюдениям и данным измерений на стандартных океанологических разрезах юго-западного шельфа о. Сахалин летом (август) и осенью (ноябрь) показано существование сезонного апвеллинга, формирующегося под действием северных и северо-западных ветров, характерных для зимнего муссона. В этом районе он проявляется слабее, чем в северной части Татарского пролива (Шевченко и др., 2011), вследствие особенностей рельефа дна (короткий приглубый шельф) и большой толщины верхнего прогретого слоя, но достаточно явно. При этом происходит подъем глубинной воды, богатой биогенными элементами и минеральным фосфором, что важно для развития молодой поросли ламинарии. В теплый период года, в условиях преобладания ветров южного румба, ветровой апвеллинг проявляется в данном районе эпизодически (4–5 раз за сезон) в виде резких, до 12–15 °С, понижений температуры воды в прибрежье продолжительностью от 3 до 12 суток. Чаще всего они наблюдаются при прохождении циклонов над южной частью Сахалина или о. Хоккайдо, при их выходе в южную часть Охотского моря или к южным Курильским островам над изучаемым районом формируются сгонные ветра восточного и северо-восточного румбов.

**Ключевые слова:** апвеллинг, ветер, муссон, температура воды, сгон, шельф, нитратный азот, кремний, фосфор, юго-западный Сахалин

### Введение

Сахалинский филиал ФГБНУ «ВНИРО» в течение многих лет проводит работы по мониторингу состояния полей ламинарии у юго-западного побережья Сахалина. Это обусловлено тем обстоятельством, что наметилась опасная тенденция замещения этого ценного пищевого продукта не представляющими практического интереса кораллиновыми водорослями, что является определенной угрозой для состояния запаса и сказывается на объемах добычи ламинарии. Работы по мониторингу включают визуальные осмотры полей ламинарии, а также контроль гидрологических и гидрохимических показателей морской воды на нескольких выбранных полигонах. В частности, на трех из них – на самом северном участке Антоново вблизи с. Яблочное

в 2020 и 2022 гг., а также на южном фланге изучаемого участка побережья, в районе с. Шебунино 2021 г. и у м. Богдановича в 2022 г. (рисунок 1) – устанавливался логгер – измеритель температуры морской воды и придонного гидростатического давления, которое пересчитывалось в колебания уровня моря. Это было сделано с целью постоянного наблюдения за вариациями термических условий во время роста ламинарии в течение теплого сезона года, включавшего период спороношения и формирования молодой поросли. В ходе этих наблюдений были выявлены случаи резкого понижения температуры воды в прибрежье, исследование причин и особенностей которых и составило одну из целей данной работы.

Явление прибрежного апвеллинга представляет значительный интерес в связи с тем, что в результате подъема богатых биогенными веществами глубинных вод существенно возрастает продуктивность в районах, где он наблюдается (Духова, Сапожников, 2014). Ввиду его важности для функционирования экосистем прибрежных акваторий, механизмы формирования ветрового апвеллинга достаточно давно и хорошо изучены (Архипкин и др., 1987; 1990), обобщение сформировавшихся взглядов на это явление приведено в (Боуден, 1988). В последние годы при изучении апвеллинга активно используют данные инструментальных измерений и спутниковых наблюдений, а также численное моделирование (Кошелева и др., 2021). Наибольшее значение имеет апвеллинг, формирующийся в результате продолжительного действия сгонных ветров сезонного характера, что типично для районов с муссонным климатом, к которым относится и остров Сахалин. Авторы обзора (Бондаренко и др., 2012) считают, что в таких районах апвеллинг и даунвеллинг постоянно сменяют друг друга и их следует рассматривать как единое явление.

Например, для острова Сахалин летом, в теплый период года, когда преобладают ветра южного румба (май–сентябрь), благоприятные условия для возникновения апвеллинга наблюдаются у его восточного побережья (Власова и др., 2008; Рутенко и др., 2009; Шевченко, Кириллов, 2017), а у западного он проявляется эпизодически. Осенью (в Японском море гидрологические сезоны смещены на месяц по сравнению с календарными и к осени относится период октябрь–декабрь (Гидрология..., 2003)), когда устанавливаются сильные и устойчивые ветра северо-западного и северного румбов, в этом районе наблюдается заглужение поверхностной воды (даунвеллинг), а у западного берега формируется апвеллинг, что выявлено на примере северной части Татарского пролива (Шевченко и др., 2011). Характер его проявления у юго-западного побережья до настоящего времени не изучен, этот вопрос рассматривается в данной работе на основе материалов океанологических и гидрохимических съемок, выполненных Сахалинским филиалом ВНИРО на стандартных разрезах у юго-западного побережья Сахалина в конце прошлого века.

Целью работы было сравнение гидрологической и гидрохимической структуры вод у юго-западного берега о. Сахалин летом, когда над регионом преобладают прижимные ветра южного румба (летний муссон) и осенью, когда устанавливаются ветра северного и северо-западного румбов отжимного характера.

Основной задачей исследования было проанализировать вертикальные распределения океанологических и гидрохимических параметров по результатам судовых съемок, выполнявшихся на стандартных разрезах юго-западного Сахалина в различные сезоны года.

Другой задачей было выявление сравнительно кратковременных понижений температуры воды в прибрежной зоне в теплый период года в условиях летнего муссона при формировании ветров восточного и северо-восточного румбов, обусловленных прохождением атмосферных возмущений.

### Материалы и методы

Материалами для настоящего исследования послужили данные инструментальных измерений температуры морской воды и придонного гидростатического давления (уровня моря), полученные в теплый период года на полигонах наблюдения за ламинарией в прибрежной зоне юго-западного Сахалина, участка Антоново (с. Яблочное, 2020 и 2022 гг.), м. Богдановича (2022 г.) и с. Шебунино (2021 г.). Наблюдения проводились с первой декады мая по третью декаду октября, дискретность измерений составляла 10 мин. Приборы устанавливались в придонном слое на глубине 5–6 м и фиксировались при помощи бетонных блоков. Для анализа метеорологических условий в период измерений использовались данные о скорости и направлении ветра на береговых метеорологических станциях г. Холмск и г. Невельск в стандартные метеорологические сроки, взятые с сайта общего доступа: [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru) (дата обращения 10.12.2022 г.) и карты пространственного распределения приземного атмосферного давления в северо-западной части Тихого океана, предоставленные на сайте: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access> (дата обращения 18.12.2022 г.).

Помимо этого привлекались материалы судовых океанологических съемок, выполненных Сахалинским филиалом ВНИРО в 1995–1999 гг. на стандартных разрезах Т1 и Т2 (в некоторых рейсах производился также отбор проб на гидрохимические определения (Пропп, Гаврина, 2019)) и средних многолетних распределений температуры и солености на разрезе п. Перепутье – о. Монерон – м. Олимпиады (ПМ, восточная часть разреза, от меридиана 140° в. д.). Эта информация хранится в базе данных филиала NiroPro и анализировалась ранее в работе (Шевченко и др., 2018). Также использовались усредненные помесечно данные спутниковых наблюдений за температурой поверхности моря в Татарском проливе (1998–2021), полученные при помощи имеющейся в филиале спутниковой приемной станции TeraScan. Пространственное разрешение данных составляло четверть градуса.

Для исследования применялись стандартные методы статистического анализа данных наблюдений. Вертикальные распределения температуры морской воды и гидрохимических элементов на разрезах строились при помощи программного комплекса обработки океанологических данных OceanDataView (<https://odv.awi.de>, дата обращения 03.05.2021 г.).

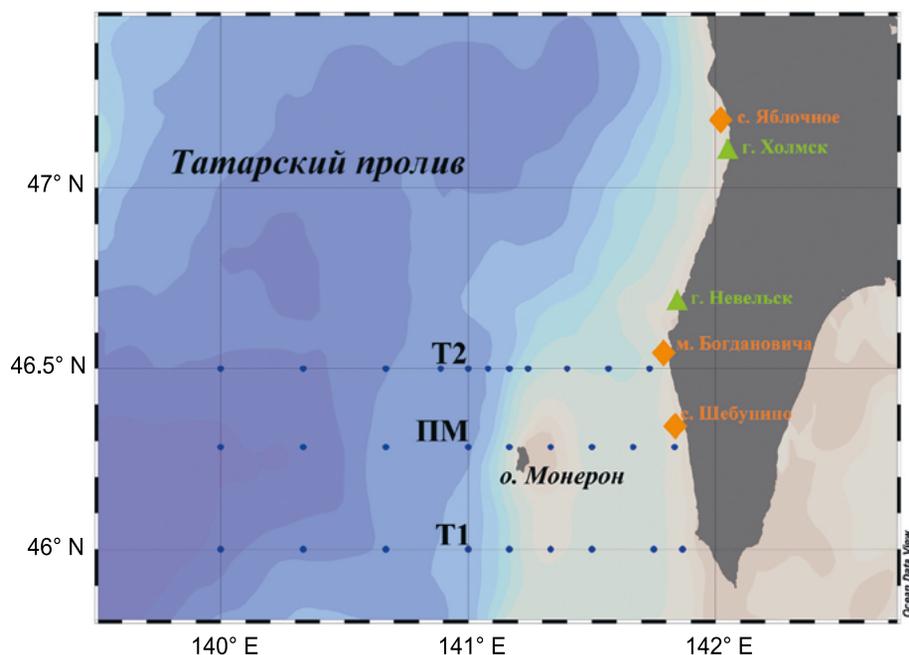


Рис. 1 – Положение станций стандартных океанологических разрезов Т1, Т2 и п. Перепутье – о. Монерон – м. Олимпиады (ПМ). Показано положение прибрежных измерителей температуры морской воды (оранжевые ромбы) и береговых метеорологических станций (зеленые треугольники)

## Результаты и обсуждение

### *Проявление ветрового апвеллинга осенью*

На рисунке 2 представлены средние многолетние распределения температуры поверхности моря (ТПО) в Татарском проливе в период максимального прогрева и преобладания южных ветров летом, в августе, и осенью, в ноябре, в период действия характерных для зимнего муссона ветров северного и северо-западного румбов (Като и др., 2001). Летом у западного побережья Сахалина вода более теплая, чем вблизи материка, на всем протяжении от полуострова Крильон на юге до пролива Невельского на севере. Помимо общего характера распространения теплого Цусимского течения вдоль свала глубин у берега острова, этому способствует и воздействие ветрового потока, огибающего берег справа. При этом благодаря вращению Земли возникает нагонный эффект, способствующий заглублению теплой поверхностной воды у берега (Боуден, 1998) и формированию прибрежного потока, направленного на север. Существенные различия в термических условиях в восточной и западной частях пролива подтверждаются и данными судовых океанологических съемок на стандартных разрезах пролива как в южной, так и в северной частях пролива (Пищальник и др., 2003; Шевченко и др., 2011; Шевченко и др., 2018). У юго-западного побережья Сахалина ситуация осложняется влиянием залива охотоморских вод, формирующих полосу

холодной воды у побережья полуострова Крильон (Макаров, 1950), а также наличием узкого струйного холодного Западно-Сахалинского течения.

Осенью характер распределения ТПО в Татарском проливе кардинально изменится. В северной его части теплая вода отеснена от берега острова на запад, широкая полоса холодной воды тянется от пролива Невельского до Чехово-Ильинского мелководья. Можно говорить о том, что эта область является выраженной зоной проявления сезонного ветрового апвеллинга. Южнее параллели 48° с. ш. эта полоса существенно сужается, температура воды в прибрежье не такая низкая. Это указывает на то, что явление сезонного апвеллинга здесь также существует, но выражено существенно слабее, чем в северной части пролива.

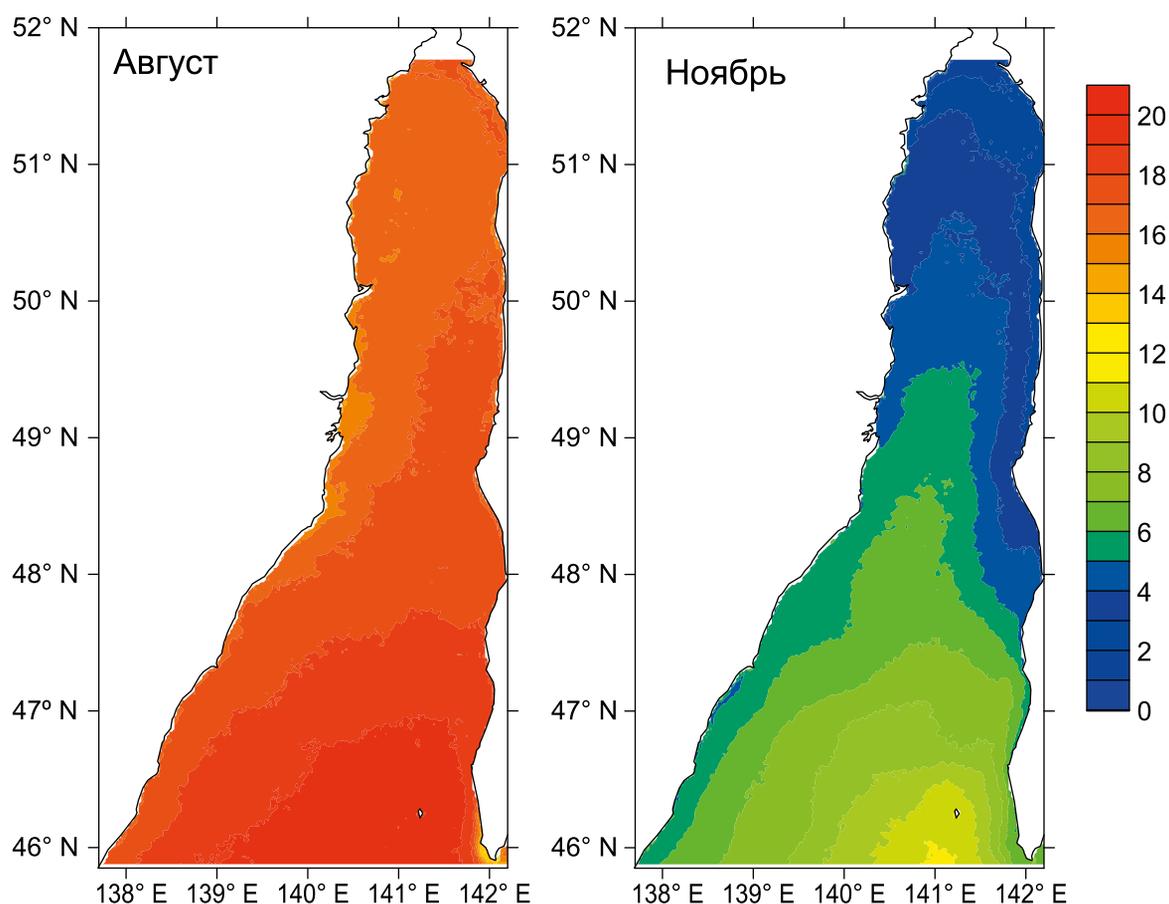


Рис. 2 – Пространственное распределение усредненных за 1998–2021 г. полей ТПО (в °С) летом (август) и осенью (ноябрь)

Рассмотрим теперь результаты судовых океанологических исследований, выполненных на стандартных разрезах у юго-западного берега о. Сахалин. На рисунке 3 представлены средние многолетние вертикальные распределения температуры морской воды на стандартном океанологическом разрезе ПМ для августа и ноября, основанные на данных (Пищальник, Бобков, 2000) и рассчитанные в работе (Шевченко и др., 2018).

В августе в поверхностном слое практически на всем протяжении разреза наблюдалась теплая вода с температурой около 18 °С, и только вблизи берега происходит резкое снижение показателя. Теплая вода (более 5 °С) заглублена до 150 м в районе о. Монерон, над материковым склоном и зоной шельфа изотермы имеют весьма крутой уклон (именно градиент в поле температуры является причиной высокой скорости Западно-Сахалинского течения в этот период года, пространственные изменения солености невелики (Шевченко и др., 2018). Прибрежная полоса, в которой вода имеет более низкую температуру, очень узкая и с трудом определяется на спутниковой карте ТПО (рисунок 2).

В ноябре характер вертикального распределения на разрезе принципиально не отличается от рассмотренного выше: наиболее теплая вода сосредоточена в районе о. Монерон, однако поверхностный слой существенно выхоложен (максимальные значения около 9 °С, что вдвое ниже, чем в августе), но на глубинах более 50 м этот осенний процесс выражен еще слабо. Уклон изотерм около берега Сахалина еще круче, полоса холодной воды вблизи него более широкая, что также согласуется со спутниковыми данными. Но в целом различия между вертикальными распределениями температуры воды в летний и осенний период далеко не такие кардинальные, как в северной части Татарского пролива (Шевченко и др., 2011), что обусловлено влиянием Западно-Сахалинского течения.

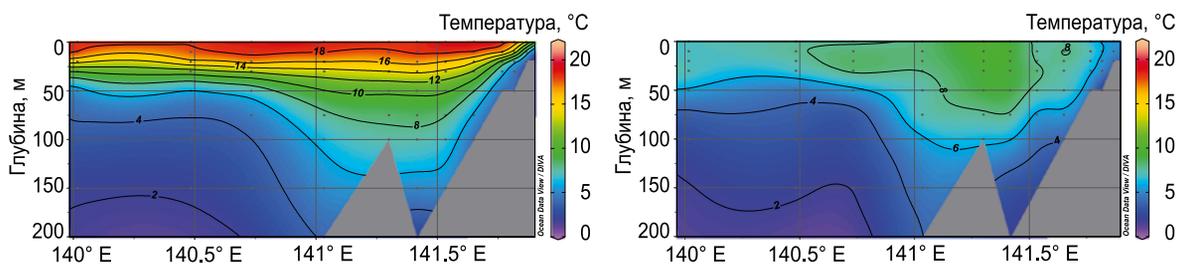


Рис. 3 – Вертикальное распределение средних многолетних значений температуры морской воды (в °С) в восточной части стандартного океанологического разреза ПМ летом (август, рисунок слева) и осенью (ноябрь, рисунок справа)

Усреднение материалов океанологических съемок в некоторых случаях может приводить к определенным искажениям при интерпретации полученных данных, обычно этот прием эффективен, если характер распределения параметра был сходен во время различных экспедиций. Тогда повторяющиеся характерные черты гидрологических условий проступают более явно, поэтому важно рассмотреть также результаты отдельных исследований. Во второй половине 1990-х годов Сахалинским филиалом ВНИРО у юго-западного побережья о. Сахалин регулярно выполнялись экспедиционные исследования, включавшие океанологические зондирования на разрезах Т1 и Т2 (на последнем количество съемок в 2 раза меньше), преимущественно весной. Тем не менее, удалось отобрать несколько ситуаций, сходных по срокам с рассмотренными выше, в том числе и выполненных в разные сезоны одного года. На рисунке 4 представлены вертикальные распределения температуры морской воды на стандартных разрезах Т1 и Т2 летом (6–8 августа) и осенью (21–22 ноября) 1999 г.

На более северном разрезе Т2 характер вертикального распределения температуры воды в августе 1999 г. сходен со средним многолетним распределением на разрезе ПМ. В верхнем слое толщиной около 15 м находилась теплая вода с температурой 18–19 °С, в прибрежной зоне ее значения снижались до 10 °С на самой близкой к берегу станции, а на глубине около 10 м на ней – до 1 °С. Изотерма 6 °С заглублена в районе поднятия, являющегося продолжением о. Монерон, до 80–90 м, уклон изотерм возрастает по мере приближения к берегу. В ноябре вода в поверхностном слое выхолажена (самое высокое значение в районе поднятия – около 9 °С), на глубинах более 50 м оно проявляется в меньшей степени. Так, изотерма 6 °С поднимается до глубины 60–70 м. Уклон изотерм у берега возрастает, ширина прибрежной полосы холодной воды увеличивается.

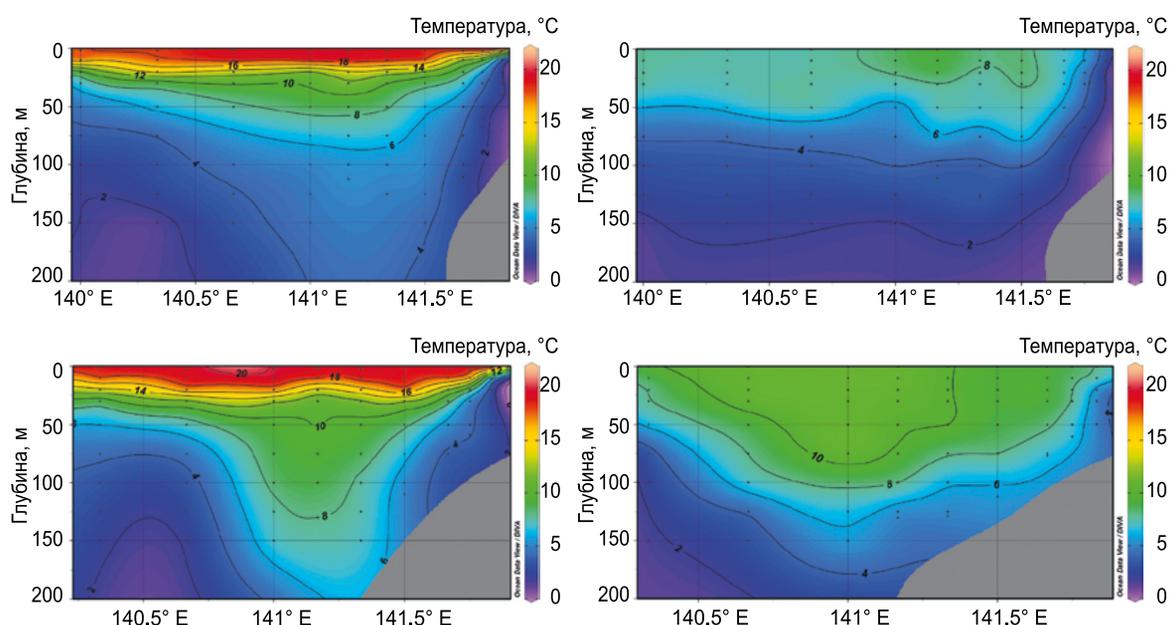


Рис. 4 – Вертикальное распределение значений температуры морской воды (в °С) по измерениям на стандартных океанологических разрезах Т2 (верхний рисунок) и Т1 (нижний) в августе (рисунки слева) и ноябре 1999 г. (справа)

На южном разрезе Т1 распределение температуры в августе практически идентично рассмотренному выше на разрезе Т2. Из основных различий отметим более значительное заглубление теплой воды в районе поднятия (южного отрога о. Монерон), изотерма 6 °С доходит до глубины 170 м, а также отсутствие очень холодной воды с температурой 1–3 °С в подповерхностном слое вблизи берега. Распределение температуры в ноябре имело более существенные различия с разрезом, расположенным севернее. Выхолаживание поверхностного слоя воды было не таким значительным, самые высокие значения параметра превышали 11.5 °С, изотерма 6 °С поднялась до глубины 100–120 м. Прибрежная полоса холодной воды широкая, но минимальные значения температуры там выше, чем на Т2.

Анализировались также материалы океанологических съемок, выполненных на этих разрезах в августе и в декабре 1996 г. Выявлено, что в декабре явление прибрежного апвеллинга также диагностируется у юго-западного берега о. Сахалин, но в вертикальных распределениях температуры морской воды оно выражено не так явно, как в ноябре, из-за более сильного выхолаживания поверхностного слоя.

Гидрохимические исследования выполнялись на стандартных разрезах существенно реже, чем океанологические (Пропп, Гаврина, 2019), в частности, отбор проб воды не осуществлялся в августе 1999 г., но был выполнен в ноябре. На рисунке 5 представлены вертикальные распределения нитратного азота, кремния и минерального фосфора на разрезах T2 и T1 в осенний период.

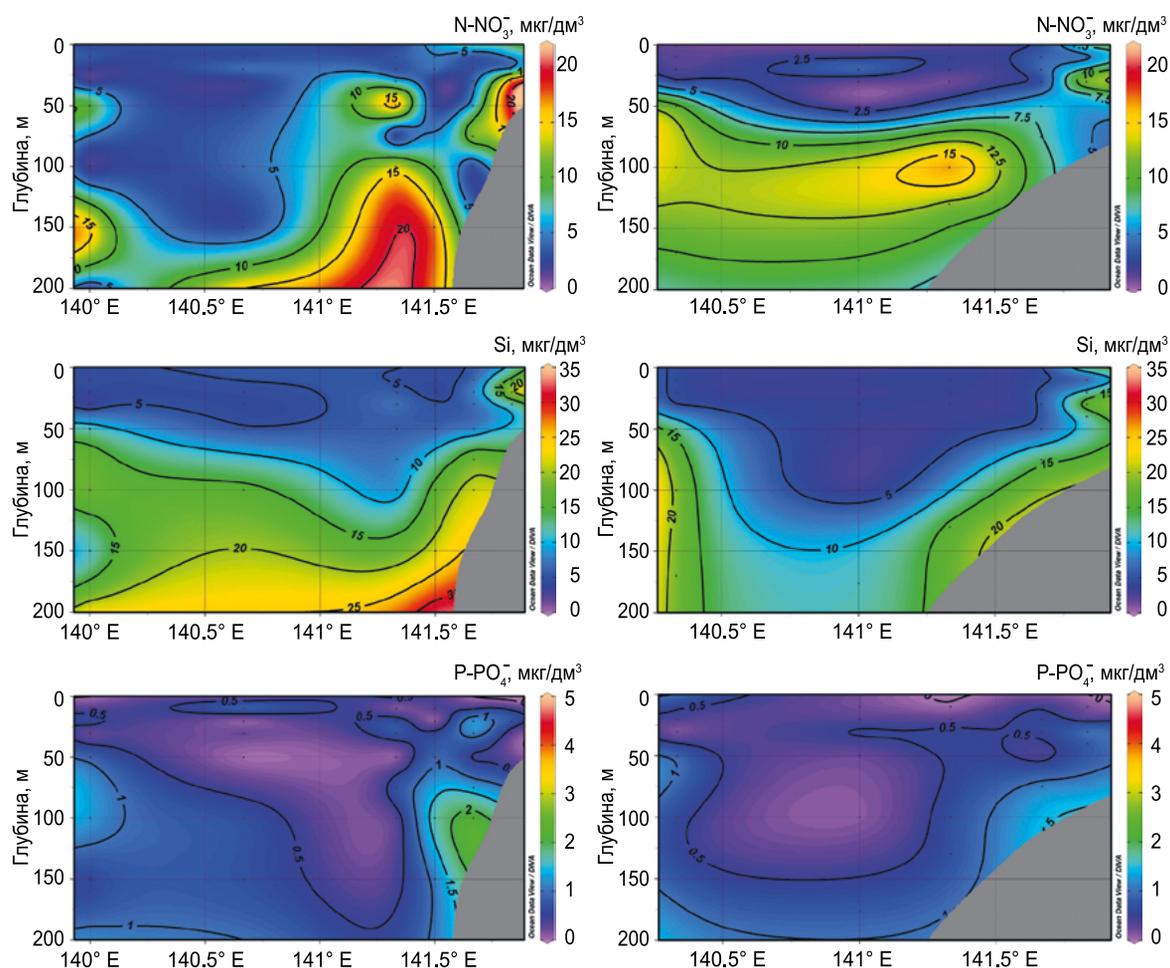


Рис. 5 – Вертикальное распределение концентрации нитратного азота (верхний рисунок), минерального кремния (средний) и фосфора (нижний) в морской воде (в  $\mu\text{кг}/\text{л}$ ) по измерениям на стандартных океанологических разрезах T2 (рисунки слева) и T1 (справа) в ноябре 1999 г.

Распределения концентрации нитратного азота явно указывают на подъем в прибрежной зоне вод, богатых биогенными элементами. На шельфе и континентальном склоне на разрезе T2 его содержание достигает 20  $\mu\text{кг}/\text{л}$ , в то время как

в поверхностном слое на удалении от берега колеблется в пределах от 3 до 5 мкг/л. Несколько в меньшей степени, но так же достаточно отчетливо, это выражено на разрезе П1. Значения показателя на шельфе составляют 8–10, на склоне – 12–15, а на мористых станциях – от 2 до 5 мкг/л.

Близкая картина характерна и для концентрации кремния в морской воде. Более высокие показатели отмечены на обоих разрезах в сравнительно тонком слое над шельфом и материковым склоном (от 10 до 20 мкг/л), в то время как в поверхностном слое в открытом море этот показатель не превышал 5 мкг/л.

Не так отчетливо влияние прибрежного апвеллинга сказывается на распределении минерального фосфора, содержание этого элемента в целом находилось на низком уровне (менее 0.5 мкг/л), однако над материковым склоном оно возрастало в 3–4 раза.

Поступление из более глубоких слоев биогенов и иных элементов, имеющих важное значение для продуцирования ламинарии, в частности, фосфора, при положительных значениях температуры морской воды (4–6 °С) несомненно является благоприятным фактором для произрастания этого вида макрофитов (прежде всего, молодой поросли), имеющих важное промышленное значение.

Приведенные примеры показывают, что в осенний период, после перестройки поля ветра от летнего муссона к зимнему, происходящей в конце сентября – начале октября, у юго-западного побережья о. Сахалин развивается сезонный прибрежный апвеллинг. Он выражен заметно в меньшей степени, чем в северной части Татарского пролива (разрез м. Корсакова – м. Сюркум) (Шевченко и др., 2011), но так же достаточно явно. Вероятно, более слабая выраженность этого явления у юго-западного берега острова обусловлена узостью шельфа в данном районе, что согласуется с результатами работы (Кошелева и др., 2021), а также значительной толщиной верхнего прогретого слоя (более 100 м на разрезе ПМ против примерно 25 м в северной части пролива).

### *Ветровой апвеллинг в теплый период года*

Как отмечалось в работе (Шевченко, Кириллов, 2017), у юго-западного побережья о. Сахалин резкие понижения температуры воды в прибрежной зоне (измерения проводились в портовом ковше портпункта с. Яболчное, недалеко от полигона наблюдения за ламинарией участка Антоново) происходили эпизодически, при усилении ветров северного и северо-восточного румбов, так как характерные в целом для теплого сезона южные ветра имеют в этом районе нагонный характер. Рассмотрим данный вопрос на основе инструментальных измерений температуры морской воды в прибрежных районах юго-западного Сахалина на полигонах наблюдения за полями ламинарии.

На рисунке 6 представлены графики вариаций температуры морской воды и уровня моря на полигонах наблюдения за ламинарией в теплый период 2020–2022 гг. В Антоново в мае – октябре 2020 г. они имеют вполне закономерный характер постепенного прогрева с 5 °С в третьей декаде мая до 20 °С во второй половине августа,

после чего плавно снижаются до 12 °С в конце октября. На этом фоне четко выделяются 6 случаев резких понижений температуры, два из которых, зафиксированных 12 июля и 12 сентября, были относительно кратковременными (последнее – менее суток) и в дальнейшем не анализировались.

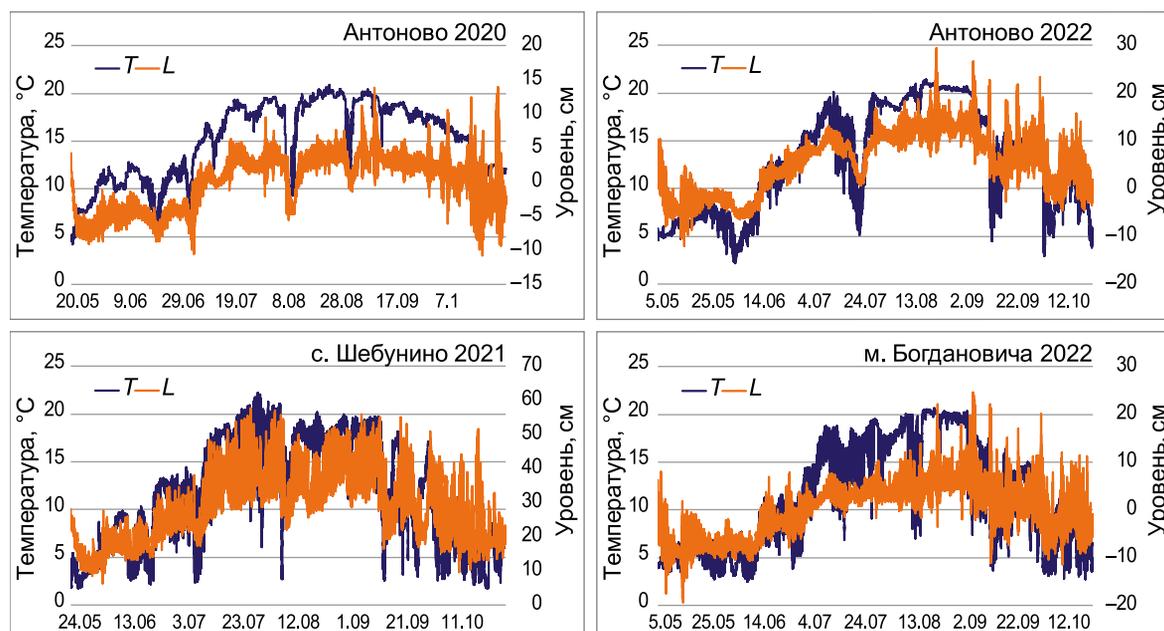


Рис. 6 – Вариации температуры морской воды ( $T$ , °C) и уровня моря ( $L$ , см) на полигонах Антоново (верхние рисунки), с. Шебунино и м. Богдановича (нижние) в период с мая по октябрь 2020–2022 гг.

Рассмотрим наиболее интересную ситуацию, наблюдавшуюся в период максимального прогрева прибрежной акватории в период с 7 по 12 августа. Температура начала снижаться в 10 утра с 19 °С и к концу суток достигла 10 °С, минимум в 7.5 °С был отмечен 9 августа в 4 утра, а к полудню 12 августа значения параметра вернулись на начальную отметку. Этому событию предшествовало усиление ветра юго-восточного и восточного румбов до 6–7 м/с, происходившее 4–5 августа. Затем скорость ветра уменьшилась до 2–4 м/с, и он стал менее устойчивым по направлению, меняясь от юг-юго-восточного до северного, но сохранял сгонный характер до середины дня 11 августа. Затем установилось типичное для летнего сезона преобладание ветров южного и юго-западного румбов.

Остальные ситуации, отмеченные 20–22 июня, 2–4 июля и 30 августа – 2 сентября, были менее продолжительными и глубокими, но развивались по сходному сценарию. Резкие понижения температуры совпадали с понижениями уровня моря – сгонными, которые формируются при отжимных ветрах.

Общий характер изменений термических условий в районе с. Шебунино в мае – октябре 2021 г. сходен с рассмотренным выше в Антоново, только прогрев на южном участке района мониторинга был более быстрым (начинался с более низкой отметки 3 °С и достиг максимума в 21.6 °С в третьей декаде июля). Также более быстро, чем

на северном участке района в предшествующем году, происходило охлаждение прибрежной акватории до примерно 5 °С.

На этом фоне еще более резкими выглядят понижения температуры, так как ее значения опускались до низких отметок (менее 3 °С). Рассмотрим более детально две ситуации, происходившие 7–12 августа и 12–17 сентября. Отметим, что эти вариации температуры и на данной станции сопровождались понижением уровня моря – сгонами величиной 10–15 см. В обоих случаях наблюдался умеренный ветер – 3–4 м/с юго-восточного румба. Впрочем, как уже отмечалось выше, метеостанция в г. Невельске прикрыта горами с восточного направления, и ветер этого и близких румбов заметно ослабляется, в то время как в районе с. Шебунино, из-за наличия долины, этого, скорее всего, не происходит. При перестройке атмосферной циркуляции к ветрам южного и юго-западного направлений, значения температуры быстро возвращаются к обычным отметкам 17–20 °С.

В 2022 г. приборы были установлены на двух полигонах – Антоново и м. Богдановича. В результате этих постановок были получены продолжительные синхронные серии наблюдений за вариациями температуры морской воды и гидростатического давления (в обоих случаях измерения начинались 5 мая и были прекращены 24 октября).

На полигоне Антоново было выявлено 4 случая резких понижений температуры морской воды, они фиксировались 2–10 июня, 15–29 июля, 14–19 сентября и 5–9 октября 2022 г. Наибольший интерес представляла ситуация во второй половине июля, во-первых, тогда снижение температуры было самым значительным, почти на 15 °С (с 19.6 до 5 °С), во-вторых, наиболее продолжительным по времени (около 2 недель). При этом оно сопровождалось существенным сгоном, более 10 см.

Характерно, что на полигоне в районе м. Богдановича в этой ситуации снижение температуры было существенно более слабым и сместилось по времени на двое суток. Несмотря на весьма высокую корреляцию между рядами температуры на полигонах ( $r = 0.9$ ), наиболее значительные понижения температуры на более южной станции отмечены 27 июня – 2 июля и 12–17 августа, когда на полигоне Антоново наблюдались лишь незначительные отклонения в графиках вариаций температуры. Только в середине сентября понижение произошло синхронно и имело одинаковую величину на обоих датчиках.

Чтобы попытаться выяснить причину значимых понижений и существенных расхождений в характере вариаций температуры на расстоянии чуть менее 70 км, были проанализированы карты распределения приземного атмосферного давления, взятые с сайта <https://www.ncdc.noaa.gov>. На рисунке 7 представлены пространственные распределения приземного атмосферного давления за 18 и 20 июля 2022 г., на которых видно, что в этот период над изучаемой областью прошел глубокий циклон, пересек Сахалин и вышел в южную часть Охотского моря. При таком положении центра циклона над Татарским проливом формируются сгонные ветра восточного или северо-восточного направлений, которые и могут быть причиной наблюдаемого явления.

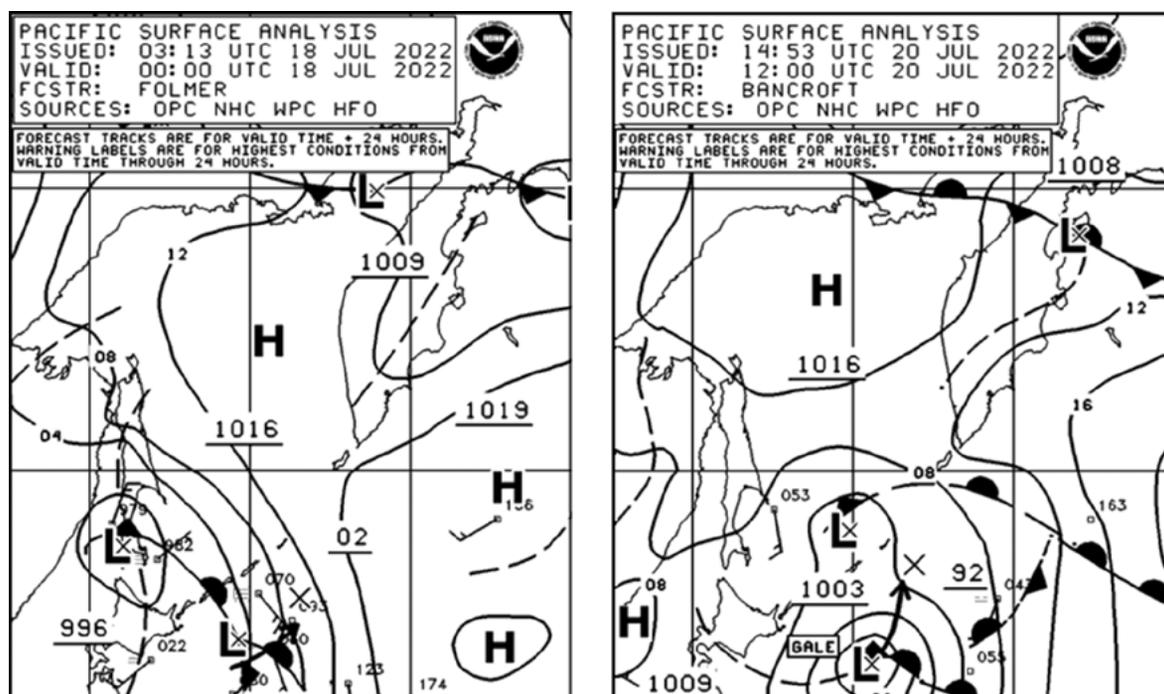


Рис. 7 – Пространственные распределения приземного атмосферного давления над Охотским морем и прилегающими районами за 18 июля (слева) и 20 июля (справа) 2022 г. (срок 12 часов UTC) по данным сайта <https://www.ncdc.noaa.gov>

Характер воздействия на разные участки побережья может существенно различаться в зависимости от конкретной траектории и глубины циклона, но, вероятно, в той или иной степени ветровой апвеллинг проявляется на всем западном побережье острова. Аналогичные атмосферные условия были причиной возникновения рассмотренного выше апвеллинга в августе 2020 г. – глубокий циклон двигался в восточном направлении южнее Сахалина, над о. Хоккайдо, и также на определенном этапе вызвал сильные ветра восточного и северо-восточного румбов над изучаемым районом. Очевидно, именно такие ситуации являются главной причиной ветрового апвеллинга у юго-западного побережья Сахалина в теплый период года. Вероятно, аналогичные, но менее продолжительные понижения температуры, могут возникать и при прохождении не таких значительных атмосферных возмущений, например, атмосферных фронтов.

### Заключение

В результате проведенных исследований показано, что в осенний период (октябрь–декабрь) гидролого-гидрохимическая структура вод согласуется с представлениями о сезонном ветровом апвеллинге, который формируется у юго-западного берега о. Сахалин под действием ветров северного и близкого к нему румбов, характерных для осенне-зимнего сезона (зимний муссон). Как на спутниковых распределениях

ТПО, так и в вертикальных распределениях температуры морской воды, это явление в данном районе выражено существенно слабее, чем в северной части Татарского пролива (Шевченко и др., 2011). Вероятно, это обусловлено свойствами локальной топографии района, характеризующейся узким приглубым шельфом, а также существенно большей толщиной теплого поверхностного слоя (более 100 м, благодаря влиянию Цусимского течения, и около 25 м на разрезе м. Корсакова – м. Сюркум). Различия между летом и осенью здесь небольшие из-за подъема холодной воды в теплый период года, вследствие интенсификации Западно-Сахалинского течения, носящего компенсационный характер.

Явление прибрежного апвеллинга у юго-западного берега о. Сахалин в осенний период способствует подъему из более глубоких слоев воды, богатой биогенными и иными химическими элементами, важными для роста молодых растений ламинарии (в частности, фосфора). Важно также, что это происходит при положительных значениях температуры в 4–6 °С в ноябре и более высоких – в октябре.

Летом, когда преобладают ветра южного румба (летний муссон) нагонного характера, условия для формирования ветрового апвеллинга у юго-западного побережья Сахалина возникают эпизодически. Наиболее значимые ситуации отмечены при прохождении циклонов над южной частью острова или находящимся к югу от него о. Хоккайдо (Япония). При выходе центра атмосферного возмущения в южную часть Охотского моря или к южным Курильским островам, над изучаемым районом формируются сгонные ветра восточного и близких к нему румбов, которые и являются причиной резкого понижения температуры воды (до 10–12 °С) в прибрежной зоне продолжительностью 5–7 суток. Не такие существенные и менее продолжительные понижения температуры могут наблюдаться и при прохождении над изучаемым районом атмосферных фронтов. Резкие понижения температуры морской воды в прибрежной зоне в период ската молоди тихоокеанских лососей могут представлять для нее серьезную опасность, а также негативно сказываться на подходах горбуши в период ее нереста.

Характерной особенностью апвеллинга у юго-западного побережья о. Сахалин в теплый период года является быстрый подъем холодной воды при перестройке к ветрам сгонного характера, несмотря на значительную толщину верхнего прогретого слоя. Вероятно, это связано с тем, что холодная вода здесь находится достаточно близко к поверхности благодаря действию Западно-Сахалинского течения. Даже сравнительно кратковременное поступление биогенных элементов летом в результате подъема глубинной воды может иметь важное значение для развития ламинарии в данном районе.

### Список литературы

1. *Архипкин В. С., Еремеев В. Н., Иванов В. А.* Апвеллинг в пограничных областях океана: Препринт. Севастополь: МГИ АН УССР, 1987. 46 с.
2. *Архипкин В. С.* Особенности структуры и динамики прибрежного апвеллинга в Каспийском море. В кн.: Каспийское море. Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. С. 61–74.
3. *Бондаренко А. Л., Борисов Е. В., Серых И. В., Суркова Г. В., Филиппов Ю. Г.* Закономерности формирования апвеллинга Мирового океана // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 11. С. 75–81.
4. *Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 322 с.
5. *Власова Г. А., Васильев А. С., Шевченко Г. В.* Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 2008. 359 с.
6. *Гидрология и гидрохимия морей. Том VIII: Японское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия.* СПб: Гидрометеиздат, 2003. 398 с.
7. *Духова Л. А., Сапожников В. В.* Гидрохимические показатели первичной продукции в зонах Перуанского и Канарского апвеллингов // *Труды ВНИРО*. 2014. Т. 152. С. 85–100.
8. *Кантаков Г. А., Частиков В. Н., Шевченко Г. В.* Современные исследования течений в рыбопромысловых районах Сахалино-Курильского региона // *Труды СахНИРО*. 2002. № 4. С. 3–21.
9. *Като Э., Савельев В. Ю., Шевченко Г. В.* Режимные характеристики ветра для острова Сахалин, полученные на основе инструментальных данных // *Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. С. 177–194.
10. *Кошелева А. В., Яроцук И. О., Храпченков Ф. Ф., Пивоваров А. А., Самченко А. Н., Швырев А. Н., Коротченко Р. А.* Апвеллинг на узком шельфе Японского моря в 2011 г. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 1. С. 31–42. <https://doi.org/10.7868/S2073667321010032>.
11. *Макаров С. О.* Гидрологические исследования, произведенные в 1895 и 1896 гг. в Лаперузском проливе и других местах. Океанографические работы. М.: Географгиз, 1950. С. 263–275.
12. *Пицальник В. М., Бобков А. О.* Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2000. Ч. 1. 174 с.
13. *Пицальник В. М., Архипкин В. С., Юрасов Г. И., Ермоленко С. С.* Сезонные вариации циркуляции вод в прибрежных районах о. Сахалин // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 5. С. 87–95.
14. *Пропп Л. Н., Гаврина Л. Ю.* Сезонные вариации гидролого-гидрохимических параметров и хлорофилла-а в проливе Лаперуза (Соя) и прилегающих районах Охотского и Японского морей в 1996–1997 гг. // *Труды СахНИРО*. 2019. № 15. С. 243–279.
15. *Рутенко А. Н., Храпченков Ф. Ф., Соснин В. А.* Прибрежный апвеллинг на шельфе острова Сахалин // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 2. С. 44–53.
16. *Шевченко Г. В., Кантаков Г. А., Частиков В. Н.* Анализ данных инструментальных измерений течений в проливе Лаперуза // *Известия ТИНРО*. 2005. Т. 140. С. 203–227.
17. *Шевченко Г. В., Вилянская Е. А., Частиков В. Н.* Сезонная изменчивость океанологических условий в северной части Татарского пролива // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 1. С. 78–91.
18. *Шевченко Г. В., Кириллов К. В.* Вариации температуры воды у побережья о. Сахалин по данным инструментальных измерений // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 3. С. 68–78.

Шевченко Г. В., Марыжихин В. Е., Частиков В. Н.

19. Шевченко Г. В., Частиков В. Н., Марыжихин В. Е. Сезонные вариации морских гидрологических характеристик у юго-западного побережья острова Сахалин // Метеорология и гидрология. 2018. № 12. С. 98–104.
20. Heaps N. S. A mechanism for local upwelling along the European continental slope // *Oceanol. Acta*. 1980. Vol. 3. No. 4. P. 449–454.
21. Kantakov G. A., Shevchenko G. V. In situ observations of Tsushima and West-Sakhalin currents near La Perouse (Soya) Strait // *PICES Sci. Reports*. 1999. No. 12. P. 177–185.

Статья поступила в редакцию 27.02.2023, одобрена к печати 27.03.2023.

**Для цитирования:** Шевченко Г. В., Марыжихин В. Е., Частиков В. Н. Гидролого-гидрохимическая структура вод в зоне апвеллинга у юго-западного побережья о. Сахалин // *Океанологические исследования*. 2023. № 51 (1). С. 54–70. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).3).

## HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL WATER STRUCTURE IN THE UPWELLING ZONE OFF THE SOUTHWESTERN COAST OF SAKHALIN ISLAND

G. V. Shevchenko<sup>1,2</sup>, V. E. Maryzhikhin<sup>1</sup>, V. N. Chastikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Sakhalin Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,  
196, Komsomolskaya str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia,  
e-mail: shevchenko\_zhora@mail.ru; jonyr.27@mail.ru; v.chastikov@sakhniro.ru;*

<sup>2</sup>*Institute of Marine Geology and Geophysics,  
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,  
1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia*

Based on the spatial distributions of sea surface temperature according to satellite observations and observational data on standard oceanographic sections of the southwestern shelf of the Sakhalin Island in summer (August) and autumn (November) shows the existence of seasonal upwelling, which is formed under the influence of northerly and northwesterly winds, typical of the winter monsoon. In this area, it manifests to a lesser extent than in the northern part of the Tatar Strait (Shevchenko et al., 2011) due to the features of the bottom topography (short deep shelf) and the large thickness of the upper heated layer, but quite clearly. At the same time, deep water rises, rich in biogenic elements and mineral phosphorus, which is important for the development of young growth of kelp. In the warm period of the year, under the conditions of the prevailing southerly wind, upwelling is observed in this area sporadically (4–5 times per season) in the form of sharp, up to 12–15 °C, water temperature drops in the coastal area lasting from 3 to 12 days. Most often they occur during the passage of cyclones over the southern part of Sakhalin or Hokkaido Island, when they enter the southern part of the Sea of Okhotsk or the South Kuril Islands and formed east and northeast blowing winds over the study area.

**Keywords:** upwelling, wind, monsoon, water temperature, surge, shelf, nitrate nitrogen, silicon, phosphorus, southwestern Sakhalin

## References

1. Arhipkin, V. S., V. N. Ereemeev, and V. A. Ivanov, 1987: *Apvelling v pogranichnykh oblastyakh okeana (Upwelling in the border areas of the ocean)*. Preprint, Sevastopol', MGI AN USSR, 46 p.
2. Arhipkin, V. S., 1990: Osobennosti struktury i dinamiki pribreznogo apvellinga v Kaspijskom more (Features of the structure and dynamics of coastal upwelling in the Caspian Sea). In: *Kaspijskoe more. Struktura i dinamika vod*. Moscow, Nauka, 61–74.
3. Bondarenko, A. L., E. V. Borisov, I. V. Seryh, G. V. Surkova, and Yu. G. Filippov, 2012: Zakonomernosti formirovaniya apvellinga Mirovogo okeana (Regularities of the formation of the upwelling of the World Ocean). *Meteorologiya i gidrologiya*, **11**, 75–81.
4. Bowden, K., 1988: *Fizicheskaya okeanografiya pribrezhnykh vod (Physical oceanography of coastal waters)*. Moscow, Mir, 322 p.
5. Duhova, L. A. and V. V. Sapozhnikov, 2014: Gidrohimiicheskie pokazateli pervichnoj produkcii v zonah Peruanskogo i Kanarskogo apvellinov (Hydrochemical indicators of primary production in the Peruvian and Canary upwelling zones). *Trudy VNIRO*, **152**, 85–100.
6. *Gidrologiya i gidrokhimiya morej*. 2003: Vol. VIII: Yaponskoe more. Vyp. 1: *Gidrometeorologicheskie usloviya (Hydrology and hydrochemistry of the seas. Vol. VIII: Japan Sea. Iss. 1: Hydrometeorological conditions)*, Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 398 p.
7. Heaps, N. S., 1980: A mechanism for local upwelling along the European continental slope. *Oceanol. Acta*, **3** (4), 449–454.
8. Kantakov, G. A. and G. V. Shevchenko, 1999: In situ observations of Tsushima and West-Sakhalin currents near La Perouse (Soya) Strait. *PICES Sci. Reports*, **12**, 177–185.
9. Kantakov, G. A., V. N. Chastikov, and G. V. Shevchenko, 2002: Sovremennye issledovaniya techenij v rybopromyslovyykh rajonakh Sahalino-Kuril'skogo regiona (Modern research of currents in the fishing areas of the Sakhalin-Kuril region). *Trudy SahNIRO*, **4**, 3–21.
10. Kato, E., V. Yu. Savel'ev, and G. V. Shevchenko, 2001: Rezhimnyye kharakteristiki vetra dlya ostrova Sakhalin, poluchennyye na osnove instrumental'nykh dannykh (Regime features of wind for Sakhalin Island, obtained on the base of instrumental data). *Dinamicheskie processy na shel'fe Sakhalina i Kuril'skix ostrovov*. Yuzhno-Sakhalinsk, IMGIG DVO RAN, 177–194.
11. Kosheleva, A. V., I. O. Yaroshchuk, F. F. Hrapchenkov, A. A. Pivovarov, A. N. Samchenko, A. N. Shvyrev, and R. A. Korotchenko, 2021: Apvelling na uzkom shel'fe Yaponskogo morya v 2011 g. (Upwelling on the narrow shelf of Japan Sea in 2011). *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, **14** (1), 31–42, <https://doi.org/10.7868/S2073667321010032>.
12. Makarov, S. O., 1950: *Gidrologicheskie issledovaniya, proizvedennyye v 1895 i 1896 gg. v Laperuzovom prolive i drugih mestah. Okeanograficheskie raboty (Hydrological research carried out in 1895 and 1896 in the La Perouse Strait and other places. Oceanographic works)*. Moscow, Geografiz, 263–275.
13. Pishhal'nik, V. M. and A. O. Bobkov, 2000: *Okeanograficheskiy atlas shel'fovoj zony ostrova Sakhalin (Oceanographic Atlas of shelf zone of Sakhalin Island)*. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU, 174 p.
14. Pishhal'nik, V. M., V. S. Arhipkin, G. I. Yurasov, and S. S. Ermolenko, 2003: Sezonnyye variacii cirkulyacii vod v pribrezhnykh rayonakh o. Sakhalin (Seasonal changes of water circulations in coastal areas of Sakhalin I.). *Meteorologiya i gidrologiya*, **5**, 87–95.
15. Propp, L. N. and L. Yu. Gavrina, 2019: Sezonnyye variacii gidrologo-gidrohimiicheskikh parametrov i hlorofilla-a v prolive Laperuza (Soya) i privileyushchih rajonakh Ohotskogo i Yaponskogo morej v 1996–1997 gg. (Seasonal variations of hydrological and hydrochemical

- parameters and chlorophyll-a in the La Perouse (Soya) Strait and adjacent regions of the Sea of Okhotsk and Japan Sea in 1996–1997). *Trudy SahNIRO*, **15**, 243–279.
16. Rutenko, A. N., F. F. Hrapchenkov, and V. A. Sosnin, 2009: Pribrezhnyj apvelling na shel'fe ostrova Sahalin (Coastal upwelling offshore Sakhalin Island). *Meteorologiya i gidrologiya*, **2**, 44–53.
  17. Shevchenko, G. V., G. A. Kantakov, and V. N. Chastikov, 2005: Analiz dannyh instrumental'nyh izmerenij techenij v prolive Laperuza (Analysis of data from currents instrumental measurements in the La Perouse Strait). *Izvestiya TINRO*, **140**, 203–227.
  18. Shevchenko, G. V., E. A. Vilyanskaya, and V. N. Chastikov, 2011: Sezonnaya izmenchivost' okeanologicheskikh uslovij v severnoj chasti Tatarskogo proliva (Seasonal variability of oceanological conditions in the northern part of the Tatar Strait). *Meteorologiya i gidrologiya*, **1**, 78–91.
  19. Shevchenko, G. V. and K. V. Kirillov, 2017: Variacii temperatury vody u poberezh'ya o. Sahalin po dannym instrumental'nyh izmerenij (Variations in water temperature off the coast of Sakhalin I. according to instrumental measurements). *Meteorologiya i gidrologiya*, **3**, 68–78.
  20. Shevchenko, G. V., V. N. Chastikov, and V. E. Maryzhihin, 2018: Sezonnnye variacii morskikh gidrologicheskikh harakteristik u yugo-zapadnogo poberezh'ya ostrova Sahalin (Seasonal variations in marine hydrological characteristics off the southwestern coast of Sakhalin Island). *Meteorologiya i gidrologiya*, **12**, 98–104.
  21. Vlasova, G. A., A. S. Vasil'ev, and G. V. Shevchenko, 2008: *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' struktury i dinamiki vod Ohotsk`ogo moray (Spatio-temporal variability of the structure and dynamics of the waters of the Sea of Okhotsk)*. Moscow, Nauka, 359 p.

Submitted 27.02.2023, accepted 27.03.2023.

**For citation:** Shevchenko, G. V., V. E. Maryzhikhin, and V. N. Chastikov, 2023: Hydrological and hydrochemical water structure in the upwelling zone off the Southwestern coast of Sakhalin Island. *Journal of Oceanological Research*, **51** (1), 54–70, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).3).