

УДК 551.464

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО И ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ ЗАЛИВА БЛАГОПОЛУЧИЯ (НОВАЯ ЗЕМЛЯ)

© 2017 г. С. В. Степанова, А. А. Недоспасов

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия**e-mail: s.stepanova87@gmail.com*

Поступила в редакцию 25.03.2016 г.

После доработки 16.08.2016 г.

В работе представлены результаты гидрофизических и гидрохимических исследований залива Благополучия (арх. Новая Земля) по данным комплексных экспедиций ИО РАН в Карское море за 2007, 2013 и 2014 гг. В работе основное внимание уделено анализу влияния рек Оби и Енисея и стока талых вод с берегов Новой Земли на гидрохимическую и гидрофизическую структуру вод залива, рассматриваются особенности обмена вод между заливом и прилегающей акваторией и механизмы обновления глубинных (более 100 м) вод залива. Проведена оценка возможности возникновения застойных явлений в глубинных слоях залива.

DOI: 10.7868/S0030157417010191

### ВВЕДЕНИЕ

Морфологическая особенность многих заливов Новой Земли (Благополучия, Цивольки, Степового и др.) заключается в наличии относительно глубокой котловины в центральной части залива и поднятия, а в некоторых случаях островов, на входе в залив. Такие особенности могут привести к возникновению застойных явлений и даже гипоксии в придонных слоях заливов, как это происходит в ряде норвежских фьордов при затопке в них более плотных (соленых) морских вод [13]. Для заливов Новой Земли изучение возможности возникновения таких явлений имеет особое значение в связи с наличием затопленных радиоактивных объектов, а также потенциальной возможностью накопления в них загрязняющих веществ, в том числе радионуклидов, которые могут поступать сюда с береговым стоком или эоловым переносом с участков суши, где в 50-е–80-е годы происходили испытания ядерного оружия [1]. В данной работе представлены результаты исследования залива Благополучия – в 2007 г. именно с него началось изучение заливов арх. Новая Земля в рамках экспедиции ИО РАН в Карское море и собрано наибольшее количество данных.

Залив Благополучия – фьордообразный залив Карского моря на восточном берегу северного острова Новой Земли [7]. В центральной части залива расположена котловина, максимальная глубина которой составляет более 170 м. Залив частично изолирован от акватории Карского моря островом Камни, расположенном на входе в залив. По имеющимся батиметрическим картам

максимальная глубина западного прохода не превышает 37 м, а восточного – доходит до 57 м. На основании особенностей рельефа дна было сделано предположение о возможности возникновения гипоксии в глубинных слоях залива Благополучия. Оценка таких условий стала одной из основных задач данной работы наряду с анализом особенностей гидрофизической и гидрохимической структуры вод залива в летне-осенний период.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наблюдения в заливе Благополучия проводились в середине сентября 2007 г. (54-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”), середине сентября и октябре 2013 г. (125- и 126-й рейсы НИС “Профессор Штокман”) и в конце августа 2014 г. (128-й рейс НИС “Профессор Штокман”). Всего в заливе и на подходах к нему было сделано 26 станций, схема расположения которых приведена на рис. 1. Кроме работ на станциях, во время высадок на берег проводился отбор проб из водотоков, впадающих в залив [6].

По данным наблюдений в заливе были построены продольный и поперечный разрезы для иллюстрации гидрологической и гидрохимической структуры вод. Продольный профиль пересекает бухту Укромную, котловину в центральной части залива и восточный, наиболее глубокий, проход у острова Камни. Для этого разреза использовались данные, полученные в 2013 и 2014 гг. Поперечный разрез направлен с северо-запада на юго-восток, пересекая остров Камни и оба прохода.

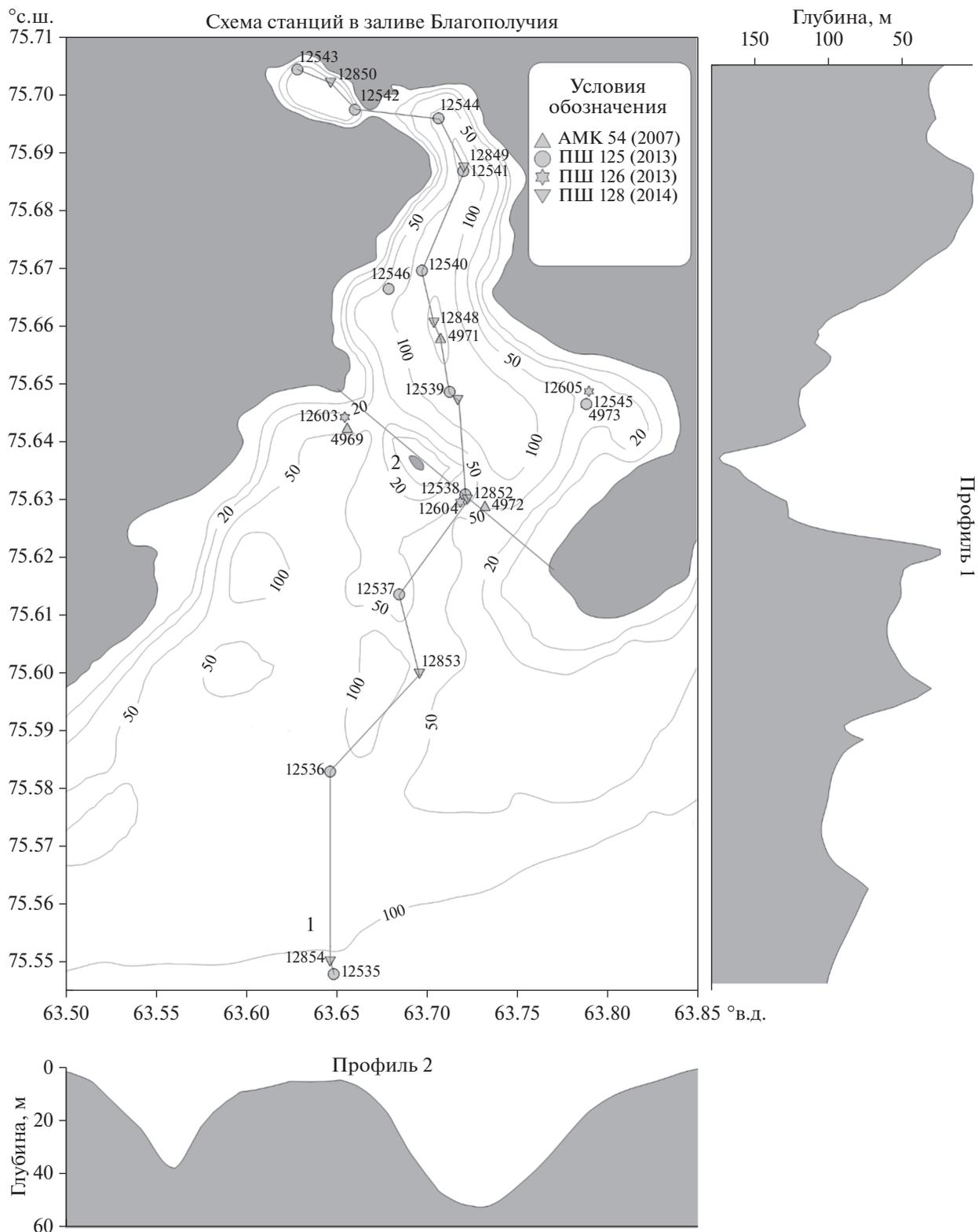


Рис. 1. Схема расположения станций в заливе Благополучия в 2007, 2013 и 2014 гг.

Данные по этому разрезу имеются за 2007 и 2013 гг. (см. выше).

В работе используются данные по температуре и солености, величинам общей щелочности и рН, растворенному кремнию, минеральному и органическому фосфору, нитратному, нитритному и аммонийному азоту, растворенному кислороду. Гидрохимические параметры определялись в судовой лаборатории стандартными методами [8, 11]. Данные по температуре и солености были получены с помощью STD-зондирований. В 2007 г. и в октябре 2013 г. использовался STD-зонд SBE 19plus. В сентябре 2013 и 2014 гг. в основном использовался STD-зонд SBE 911.

Расчеты, связанные с процессами обновления вод представляют особый интерес в связи с их экологической значимостью. Ключевыми параметрами при подобных исследованиях, помимо температуры и солености, следует считать величину рН и содержание кислорода. Примером, достаточно подробных расчетов с использованием многолетних гидрофизических и гидрохимических данных может служить работа [12]. Однако, в нашей работе, учитывая ограниченность данных, можно рассчитывать лишь некоторые критические условия — возможность возникновения условий дефицита кислорода (гипоксии) в глубинных слоях залива. Для расчетов целесообразно использовать стехиометрическое соотношение между кислородом и углеродом и между фосфором и углеродом. Основные принципы и алгоритмы использования данного соотношения хорошо известны и достаточно подробно описаны, например, в работе [10]. Были использованы данные по интегральной первичной продукции (ИПП) в заливе за 2013 и 2014 гг., любезно предоставленные А.Б. Демидовым. Значения гидрохимических параметров пересчитывались на углерод в том числе, чтобы привести все параметры к одинаковым единицам измерения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Общие гидрофизические и гидрохимические особенности залива Благополучия.** Важной особенностью гидрологической структуры Карского моря является наличие поверхностного опресненного слоя (ПОС), сформированного речным стоком, в основном Оби и Енисея. Распространение речных вод зависит, главным образом, от объема стока и ветровых условий. Принято выделять три типа распространения речных вод: западный, восточный и центральный. При западном типе распространения опресненные воды могут достигать восточного берега Новой Земли. Центральный тип распространения характеризуется проникновением опресненных вод далеко на север. При восточном типе распространения речные воды прижимаются к берегу и в виде погра-

ничного течения переносятся к Северной Земле и далее — в море Лаптевых [4, 9].

В 2007 г. наблюдался западный тип распространения речных вод, при котором опресненные воды достигали берегов Новой Земли. Толщина поверхностного опресненного слоя (16–17 psu) на станции, расположенной над Новоземельской впадиной, составляла 12 м. Ниже, до 15 м, был расположен узкий пикно-халоклин, соленость в котором увеличивалась до 32 psu [4]. Схожая гидрологическая структура наблюдалась и на входе в залив Благополучия. Однако, пикно-халоклин был расположен выше — на глубине 6 м. Помимо этого, в восточном проходе (ст. 4972) наблюдался сильно опресненный поверхностный слой (соленость на 0.5 м составляла 11 psu), в то время как вертикальное распределение солености в западном проходе характеризуется менее опресненным поверхностным слоем (17 psu на глубине 1 м) (рис. 2).

Таким образом, схожая гидрологическая структура вод на входе в залив и вне его позволяет сделать вывод, что воды ПОС могут не только достигать берегов Новой Земли под влиянием ветра и фоновых морских течений, но и поступать в залив. Отличия в распределении солености верхней толщи могут говорить об опреснении вод внутри залива за счет стока талых вод и об их преимущественном “вытекании” через восточный проход.

Распределение гидрохимических параметров в 2007 г. хорошо согласуется с предположением о влиянии вод материкового происхождения на поверхностные воды залива. В поверхностных водах залива (станции 4969, 4971–4973) по величине общей щелочности (*Alk*) и концентрации кремния хорошо прослеживается влияние материкового стока: величина *Alk* менялась в диапазоне 1.55–1.70 мг-экв/л, концентрация кремния составляла 34.5–36.5 мкг-ат/л. Такие значения общей щелочности и кремния были характерны для вод ПОС в то же время [5]. Иных вод с подобными характеристиками не наблюдалось.

В 2013 и 2014 гг. влияние стока рек Оби и Енисея в районе островов Новой Земли не наблюдалось, и опреснение поверхностных вод залива происходило за счет стока талых вод с берегов.

Сток талых вод снежников с берегов в залив Благополучия происходит в летний период в большинстве своем в его северной кутовой части, где в него впадают наиболее крупные водотоки, и в бухте Укромной. Однако, небольшие ручьи наблюдаются практически по всему периметру залива. В результате проведенных гидрохимических исследований было обнаружено, что содержание в этих водах различных форм фосфора и азота, а также кремния, значительно выше, чем наблюдаемое на станциях в заливе и на выходе из него в то же время. В таблице приведены средние

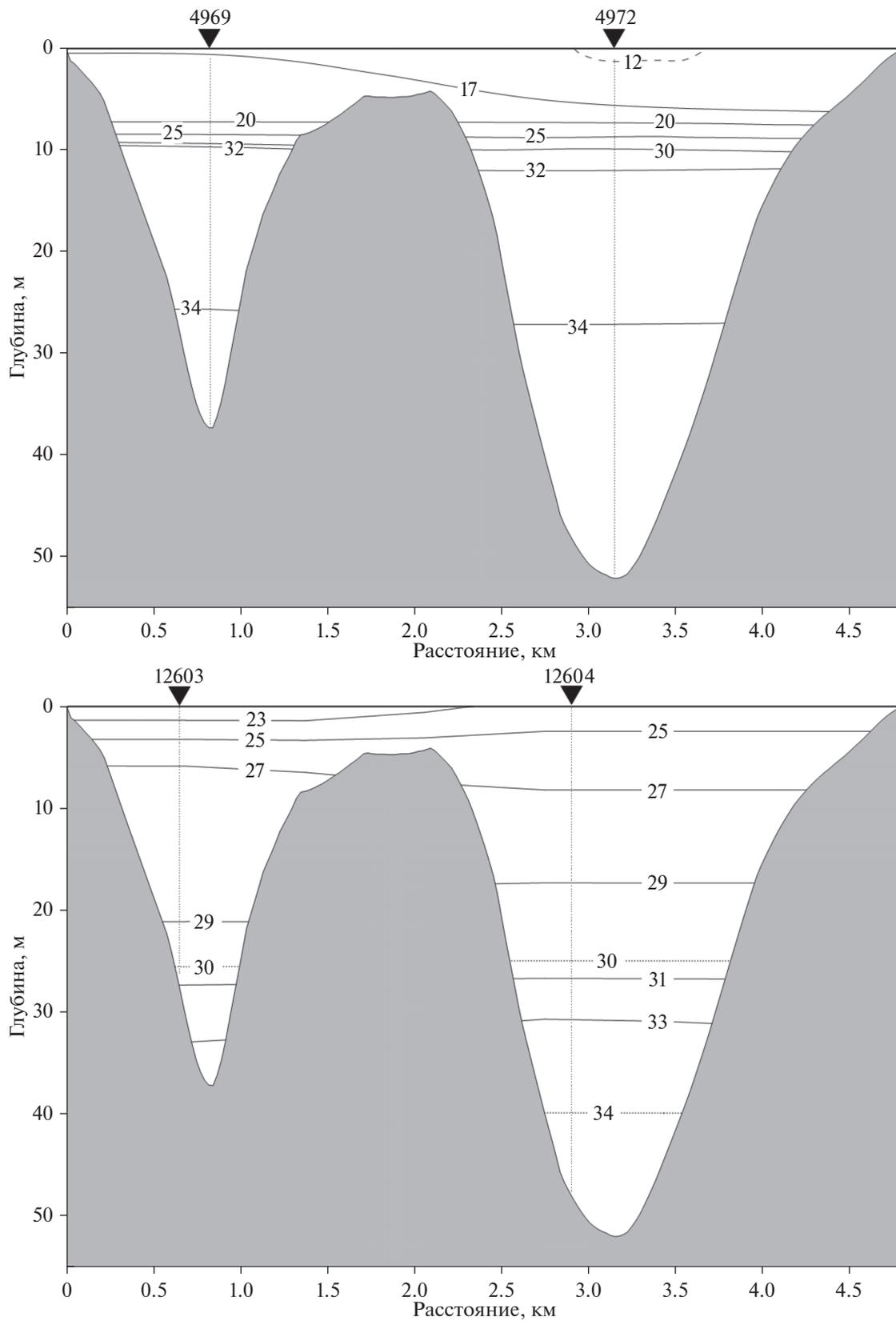


Рис. 2. Вертикальное распределение солености воды (psu) по поперечному профилю в сентябре 2007 г. (вверху) и в октябре 2013 г. (внизу).

Средние значения и диапазон изменений гидрохимических параметров за 2007, 2013 и 2014 гг.

Год	Место отбора	pH	<i>Alk</i>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	Si	PO <sub>4</sub>
2007	1	<b>8.27</b> (7.84–8.54)	<b>2.09</b> (1.62–3.54)	<b>0.13</b> (0.00–0.49)	<b>5.42</b> (0.95–4.94)	–	<b>32.94</b> (22.24–50.17)	<b>0.36</b> (0.04–1.19)
	2	<b>8.11</b> (7.90–8.21)	<b>1.74</b> (1.58–2.46)	<b>0.09</b> (0.06–0.16)	<b>2.20</b> (1.09–4.91)	–	<b>33.45</b> (31.71–36.18)	<b>0.27</b> (0.15–0.40)
	3	<b>8.11</b> (8.09–8.13)	<b>1.64</b> (1.55–1.71)	<b>0.07</b> (0.06–0.08)	<b>3.06</b> (0.15–5.96)	–	<b>34.84</b> (33.01–36.48)	<b>0.24</b> (0.18–0.32)
2013	1	<b>8.21</b> (7.80–8.62)	<b>2.45</b> (0.74–4.47)	<b>0.00</b>	<b>3.72</b> (3.04–4.48)	<b>2.97</b> (1.28–5.34)	<b>29.06</b> (6.40–42.44)	<b>0.02</b> (0.00–0.04)
	3	<b>8.08</b> (8.03–8.12)	<b>2.10</b> (1.33–2.26)	<b>0.01</b> (0.00–0.02)	<b>0.58</b> (0.00–1.54)	<b>0.95</b> (0.39–1.62)	<b>1.69</b> (0.73–5.18)	<b>0.09</b> (0.03–0.20)
	4	<b>8.08</b> (8.06–8.09)	<b>2.23</b> (2.20–2.26)	<b>0.02</b> (0.00–0.04)	<b>0.17</b> (0.00–0.38)	<b>0.66</b> (0.17–1.24)	<b>0.68</b> (0.49–0.93)	<b>0.12</b> (0.08–0.18)
2014	1	<b>8.11</b> (7.98–8.20)	<b>1.86</b> (0.90–2.62)	<b>0.10</b> (0.00–0.28)	<b>5.25</b> (3.06–8.14)	<b>2.34</b> (1.54–3.26)	<b>14.44</b> (7.93–26.84)	<b>0.94</b> (0.50–1.53)
	2	<b>8.08</b> (7.94–8.21)	<b>1.64</b> (1.14–2.21)	<b>0.09</b> (0.00–0.15)	<b>1.89</b> (0.49–2.83)	<b>2.00</b> (1.58–2.40)	<b>4.95</b> (2.09–6.90)	<b>0.81</b> (0.50–1.18)
	3	<b>8.07</b> (7.96–8.11)	<b>2.03</b> (1.33–2.22)	<b>0.02</b> (0.00–0.05)	<b>0.65</b> (0.00–2.03)	<b>0.84</b> (0.33–1.38)	<b>2.32</b> (1.41–5.01)	<b>0.56</b> (0.35–1.03)
	4	<b>8.09</b> (8.07–8.10)	<b>2.25</b> (2.20–2.29)	<b>0.02</b> (0.00–0.04)	<b>0.61</b> (0.23–0.98)	<b>1.67</b> (1.48–1.86)	<b>1.83</b> (1.41–2.24)	<b>0.52</b> (0.47–0.56)

Примечание. Место отбора: 1 – водотоки, 2 – зона смешения, 3 – поверхностные воды залива, 4 – поверхностные воды на выходе из залива. Жирным шрифтом выделены средние значения, в скобках указан диапазон.

значения и диапазон изменений концентраций биогенных элементов, а также величин общей щелочности и pH за 2007, 2013 и 2014 гг. Значения pH в водотоках обычно составляли более 8 ед. шкалы NBS, хотя для вод талого происхождения характерны более низкие значения, порядка 7.0–7.5 ед. шкалы NBS. Следует отметить и большой разброс значений величины общей щелочности — она может меняться от водотока к водотоку в диапазоне от 1 мг-экв/л (такие значения характерны, например, для зоны смешения вод Оби и Енисея с морскими водами) до 3 и более мг-экв/л (это выше, чем значение данного показателя, наблюдаемое в поверхностных водах Карского моря за тот же период исследований). Было высказано предположение о том, что подобное поведение биогенных элементов и параметров карбонатной системы может быть связано с выщелачиванием пород, слагающих берега залива. Правомочность данной гипотезы была подтверждена в рамках лабораторных исследований [6].

Распределение вод в заливе в разные годы проходило с разной интенсивностью. В 2013 г. значения солёности менее 25 psu наблюдались лишь в поверхностном слое (до 5 м) б. Укромной (рис. 3). В основной части залива влияние речного стока по солёности проявлялось слабо. В сентябре 2014 г. наблюдалось более интенсивное опреснение и

распресненный слой (менее 30 psu) хорошо прослеживался до ст. 12848 (соответствует самой глубокой точке залива), а в поверхностном слое бухты Укромной, как и годом ранее, наблюдались значения 25 psu и менее.

В октябре 2013 г. были проведены гидрофизические работы в западном и восточном проходах залива Благополучия. Как и в 2007 г. наблюдались различия в распределении солёности в поверхностном слое, однако в этом году, наоборот, солёность приповерхностных вод в восточном проходе была несколько выше солёности в западном проходе (рис. 2).

Влияние стока материковых вод с Новой Земли на акваторию залива отражается и на распределении гидрохимических параметров, особенно величины общей щелочности. По вертикальному распределению щелочности также хорошо заметно более интенсивное влияние талых вод на акваторию залива в 2014 г. — наблюдался тонкий приповерхностный слой со значениями общей щелочности менее 2.2 мг-экв/л, который хорошо прослеживался до ст. 12848. В 2013 г. влияние материкового стока с Новой Земли отчетливо проявлялось в поверхностных водах бухты Укромной и в самой северной части основной акватории залива (до ст. 12544). В целом, величина общей щелочности мало менялась по всему заливу — диапа-

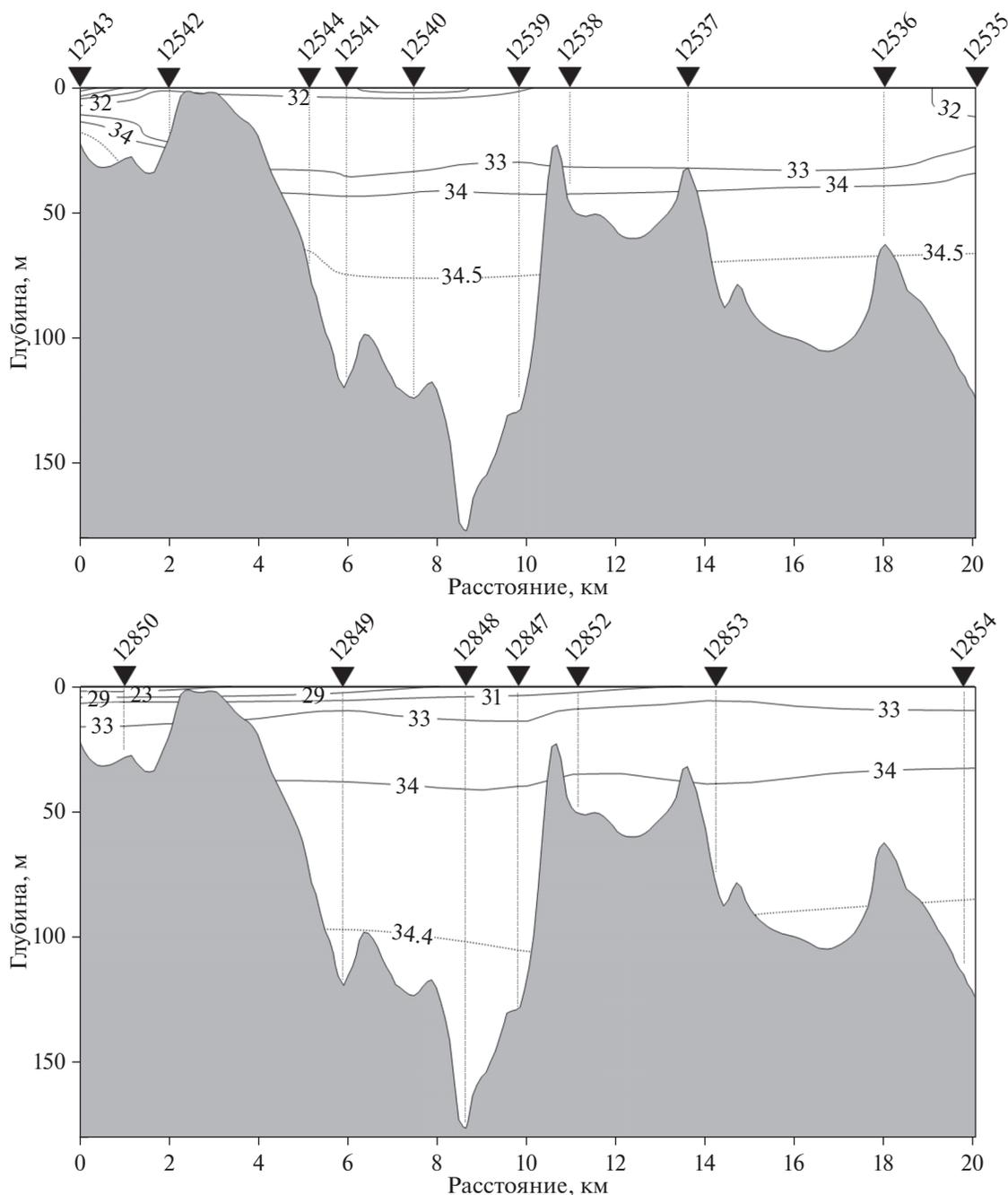


Рис. 3. Вертикальное распределение солености воды (psu) по продольному профилю в 2013 г. (вверху) и 2014 г. (внизу).

зон изменений составил 2.2–2.4 мг-экв/л. Вертикальное распределение содержания кремния, который также служит хорошим элементом-трассером речных вод, в 2013 и в 2014 гг. было схожим. Следует отметить, что верхний 50-метровый слой был сильно обеднен кремнием (менее 5 мкг-ат/л), несмотря на достаточно высокие его концентрации в водотоках, впадающих в залив. В целом, содержание кремния в поверхностных водах залива было немного выше, чем в прибрежной зоне (таблица).

Таким образом, влияние стока талых вод с берегов Новой Земли на акваторию залива выражается в формировании тонкого приповерхностного опресненного слоя (порядка 5 м), мощность и протяженность которого варьируется от года к году. Этот слой достаточно хорошо прослеживается по солености и величине общей щелочности. Концентрации биогенных элементов в нем, в отсутствие влияния вод ПОС, близки к тем, что наблюдались в поверхностных водах Карского моря в то же время [5]. Более четко влияние стока та-

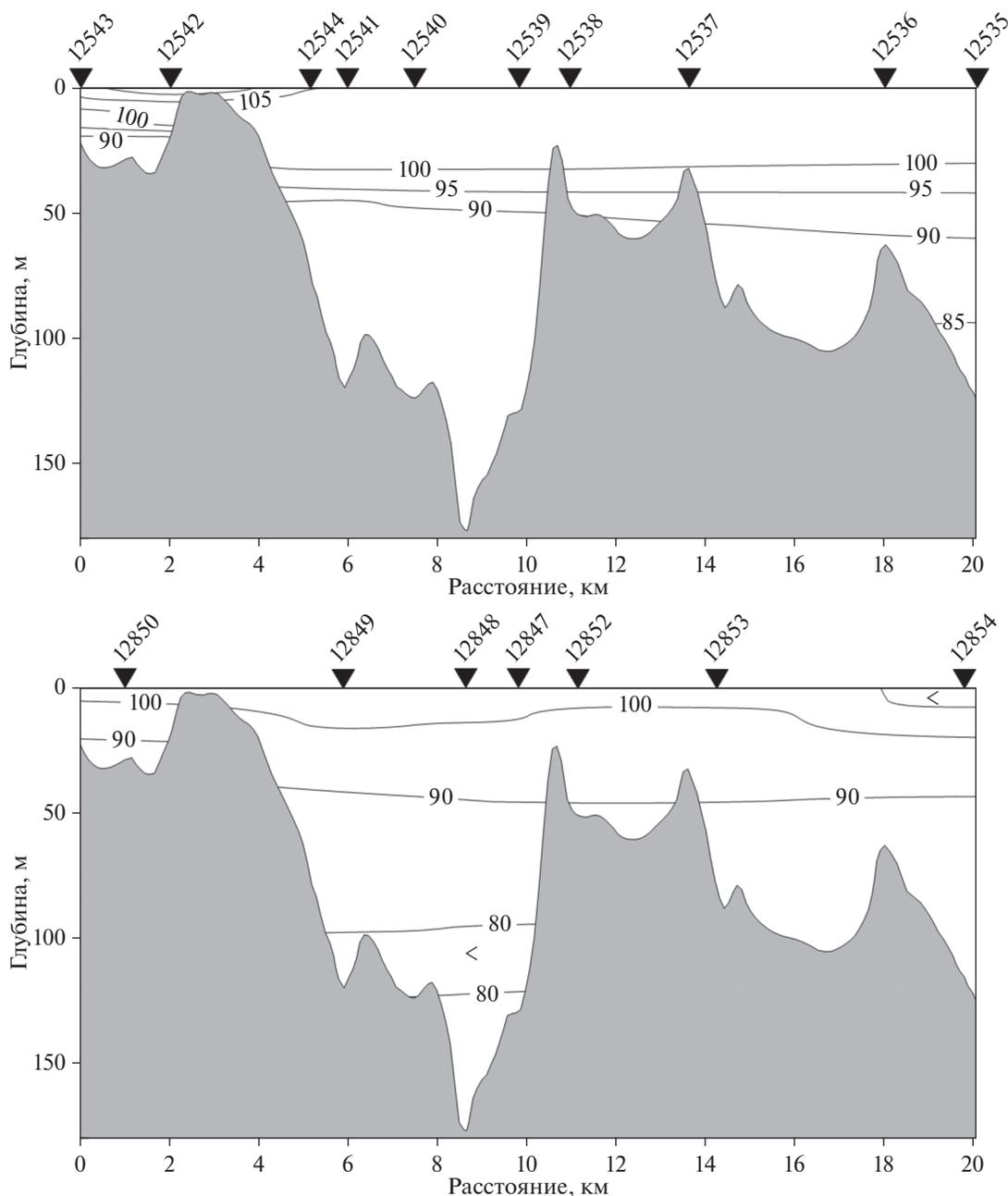


Рис. 4. Вертикальное распределение растворенного кислорода (%) по продольному профилю в сентябре 2013 г. (вверху) и в августе 2014 г. (внизу).

лых вод проявляется в бухте Укромной и, естественно, вдоль берегов залива. Здесь уже наблюдаются немного повышенные концентрации биогенных элементов и более низкие значения солености и общей щелочности.

В виду поставленных в работе задач, особый интерес представляет вертикальное распределение относительного содержания кислорода в водах залива. В летний сезон в поверхностных водах залива наблюдалось перенасыщение кислородом (до 110% в 2014 г.), что свидетельствует о биологи-

ческой активности вод в период наблюдений. Придонные воды менее насыщены кислородом, однако, снижение степени насыщения вод оказалось не настолько существенным, как предполагалось исходя из топографических особенностей залива. Минимальная зафиксированная степень насыщения кислородом составила 75% в глубинных водах залива в 2014 г. (рис. 4).

**О процессах водообмена.** Анализ имеющихся данных за 2013 и 2014 гг. позволяет сделать некоторые выводы о процессах обмена вод как внутри

залива, так и между акваторией залива и открытым морем.

Для начала, рассмотрим более подробно особенности вертикального распределения гидрофизических параметров, сопоставляя ситуацию внутри залива и на подходах к нему.

Гидрологическая структура вод прибрежной зоны характеризовалась наличием верхнего относительно теплого (более  $4^{\circ}\text{C}$ ) квазиоднородного слоя (ВКС), толщина которого составляла около 10 м. Ниже наблюдался слой с плавным изменением гидрофизических параметров до глубин 40 м. Соленость увеличивалась от 32 psu на нижней границе ВКС до 34.1 psu. Значение температуры на глубине 40 м составило  $-0.5^{\circ}\text{C}$ . Глубже был расположен холодный промежуточный слой ( $-1.18^{\circ}\text{C}$  на глубине 68 м), сформированный в результате зимнего конвективного перемешивания вод. Ниже ХПС соленость медленно увеличивается с глубиной, достигая значения 34.65 psu в придонном слое на глубине 120 м. Рост солености сопровождается плавным ростом температуры до  $-0.9^{\circ}\text{C}$  (рис. 5).

Внутри залива, под действием локальных факторов, происходит перестройка гидрологической структуры вод. В первую очередь, эти различия проявляются в верхнем 50-метровом слое. Здесь, в отличие от прибрежной части, можно выделить верхний 5-метровый опресненный тальми водами слой (около 31 psu). Под ним до 40 м наблюдается квазиоднородный слой. Нижняя его граница — расположенный на 40–45 м слой скачка гидрофизических параметров, которого также не наблюдалось в прибрежной части. Значения температуры в этом слое переходят через  $0^{\circ}\text{C}$ , опускаясь до  $-1^{\circ}\text{C}$ . Соленость в свою очередь превосходит 34 psu. Ниже, на глубинах до 68 м, воды в заливе и вне его не отличались по значениям гидрофизических параметров. Однако, в заливе, в отличие от прибрежной зоны, от 70 м и до дна росту солености с глубиной соответствовало медленное падение температуры (менее  $-1.4^{\circ}\text{C}$  ниже 100 м) до дна.

Наличие слоя с одинаковыми значениями гидрофизических параметров на глубинах до 68 м, глубже которого структура вод в заливе и на подходах к нему сильно отличается, указывает на то, что обмен между водами заливами и прибрежной зоны может существовать и на таких глубинах. Это значит, что глубины в проходах в залив могут оказаться больше, чем предполагалось исходя из картографических материалов и экспедиционных наблюдений и могут достигать 70 м. Следует отметить, что плотность глубинных вод прибрежной зоны, несмотря на более высокие значения температуры, больше плотности холодных вод залива на аналогичных глубинах. Различие достигает  $0.13\text{ кг/м}^3$  на глубине 120 м.

Вертикальное распределение параметров в прибрежной зоне в 2014 г. мало отличалось от распределения внутри залива. Гидрологическая структура вод в заливе Благополучия в 2014 г. характеризовалась наличием более мощного, по сравнению с 2013 г., опресненного приповерхностного слоя на глубинах до 15 м (около 29 psu). Ниже 50 метров распределение солености практически повторяет предыдущий год, увеличиваясь до значения 34.43 psu в придонных слоях. Различия по температуре при этом весьма существенны как в приповерхностных, так и в глубинных слоях (рис. 5). Летний прогрев выражен слабее и наблюдался лишь в верхних 10–15 м. Главным структурным отличием стало отсутствие градиентного слоя на глубинах около 40–45 м. Рост солености сопровождался медленным падением температуры до  $-0.9^{\circ}\text{C}$  в придонных слоях.

Таким образом, можно говорить о существенном изменении гидрологической структуры в заливе Благополучия, произошедшем с сентября 2013 г. по август 2014 г. Анализ данных указывает на относительно свободное горизонтальное перемешивание вод залива с прибрежными водами на глубинах до 60–70 м. Однако, более сильная стратификация вод внутри залива, по-видимому, может создавать некоторые препятствия для водообмена с открытой частью моря. Несмотря на наличие порогов, обновление вод в глубинных слоях залива возможно, а его механизмы, при этом, могут быть различны. Так ситуация 2013 г. вполне может являться результатом интенсивной зимней конвекции вод. А значительное повышение температуры глубинных вод залива, наблюдаемое в 2014 г., можно предположить, есть результат адвективного переноса вод в глубоководную впадину залива из прибрежной зоны. Это возможно при поднятии глубинных вод в прибрежной зоне в результате апвеллинга, который может возникать у восточного берега Новой Земли [3]. Для рассматриваемого случая наиболее вероятно, что обмен вод в придонных слоях произошел еще в 2013 г. до начала процессов активного вертикального перемешивания. Данное предположение не противоречит наблюдаемому распределению гидрофизических параметров. Во-первых, в обоих случаях в глубинных слоях прибрежной зоны наблюдались воды с одинаковыми характеристиками, судя по имеющимся экспедиционным данным, баренцевоморского происхождения [3], во-вторых, как было отмечено выше, плотность глубинных вод прибрежной зоны в 2013 г., несмотря на более высокие значения температуры, была больше плотности холодных вод залива. Кроме того, данное предположение хорошо объясняет и распределение гидрохимических параметров в глубинных водах залива. Так, более низкие значения насыщения кислорода и величины рН действительно могут являться след-

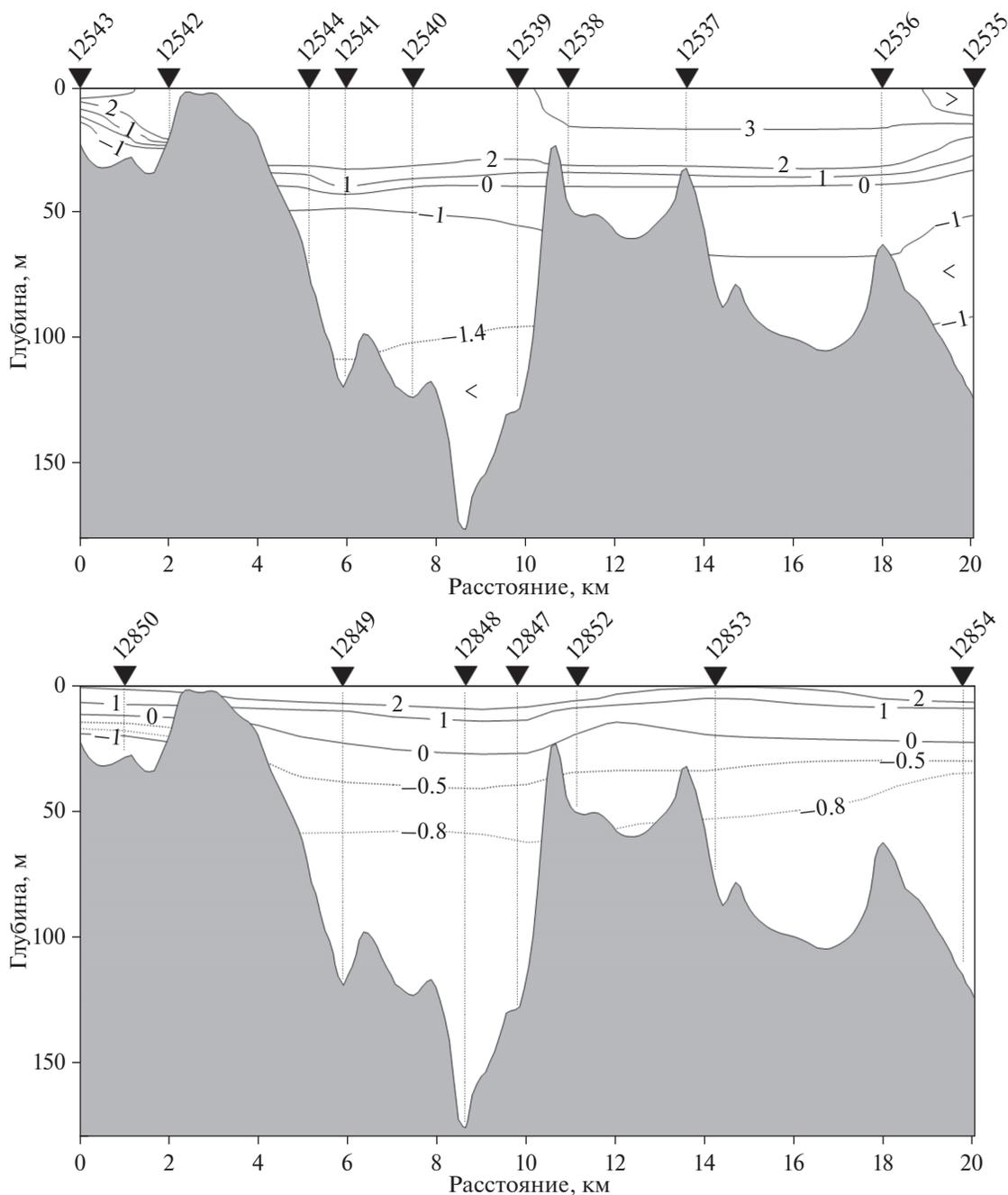


Рис. 5. Вертикальное распределение температуры воды (°C) по продольному профилю в сентябре 2013 г. (вверху) и в августе 2014 г. (внизу).

ствием того, что в глубинных слоях залива остались воды, попавшие сюда из прибрежной зоны в результате апвеллинга, которые не были затронуты вертикальной зимней конвекцией.

**Расчет возможности возникновения условий гипоксии.** Как было указано выше, это было одной из основных задач настоящей работы. Исходя из описанных особенностей гидрофизической структуры, стало ясно, что зимняя конвекция в заливе может достигать дна (хотя и не каждый

год). Таким образом, возникновение критических условий наиболее вероятно в летний период, когда существует устойчивая плотностная стратификация при наличии достаточного количества органического вещества, автохтонного и аллохтонного происхождения.

Для проведения оценки возможности возникновения гипоксии в заливе Благополучия были рассчитаны: объем вод, занимающих глубины ниже 100 м ( $0.108 \text{ км}^3$ ), площадь залива ( $37.2 \text{ км}^2$ )

и объем годового стока ( $0.1 \text{ км}^3$ ). Для оценки годового стока в залив Благополучия была рассчитана площадь водосбора, которая составила порядка  $500 \text{ км}^2$ , и использовались данные о годовом количестве осадков с учетом испарения, которое составляет  $200 \text{ мм}$  [7]. Распространение ледникового и снегового покрова в бассейне водосбора считалось стабильным.

Сначала, на основании имеющихся гидрохимических данных, была оценена концентрация органического вещества в заливе на глубинах более  $100 \text{ м}$  и рассчитано количество органики, которое может привести к возникновению гипоксии. Для оценки концентрации органического вещества использовались имеющиеся данные по содержанию органического фосфора на этих глубинах, которое через коэффициенты в стехиометрическом уравнении было пересчитано на органический углерод. Концентрация органического фосфора на рассматриваемых глубинах мало менялась от года к году и составляла в среднем  $0.5 \text{ мкг-ат/л}$ , что эквивалентно  $0.6 \text{ мгС/л}$ . То есть в глубинных слоях залива всего содержалось  $65 \text{ тС}$ . Оценить, насколько должно увеличиться содержание органики в глубинных водах залива, чтобы могли возникнуть условия гипоксии, можно через содержание кислорода. Как индикатор условий кислородо-дефицита была взята концентрация кислорода  $2 \text{ мл/л}$ , так как принято считать, что это нижняя граница кислородного оптимума для зообентоса [2]. По разнице между реально наблюдаемым содержанием кислорода и указанной величиной, было найдено, что для возникновения условий гипоксии в заливе на глубинах более  $100 \text{ м}$  содержание лабильного органического вещества должно увеличиться на  $2.15 \text{ мгС/л}$ , т.е. на  $230 \text{ тС}$ .

Далее было рассчитано, какое количество органического вещества автохтонного и аллохтонного происхождения может поступать в залив. Для оценки количества аллохтонного вещества, были использованы данные о содержании органического фосфора в водотоках, впадающих в залив, которые были пересчитаны по стехиометрическому уравнению в концентрацию органического углерода. Средняя концентрация органики в водах, стекающих в залив, по этой оценке, составляла  $0.28 \text{ мгС/л}$ . То есть, учитывая объем стока, водотоки могут выносить в залив около  $28 \text{ тС}$ .

Для оценки автохтонного органического вещества использовались данные по интегральной первичной продукции (ИПП) за сентябрь 2013 г. и август 2014 г. Расчет первичной продукции достаточно сложен, и учитывая наличие данных для исследуемой акватории только по одному сезону, затруднительно судить о годовом ходе ИПП и величинах, характерных для того или иного сезона. Чтобы оценить порядок величин и при этом заведомо не вносить ошибки, были взяты средние

значения по ИПП ( $38 \text{ мгС/м}^2$  в день в сентябре 2013 г. и  $97 \text{ мгС/м}^2$  в августе 2014 г.) и экстраполированы на соответствующий месяц (август и сентябрь). В результате, по данному расчету, на всей площади залива может образоваться порядка  $150 \text{ тС}$ .

Итак, в глубинных слоях залива (более  $100 \text{ м}$ ) содержится органического вещества порядка  $65 \text{ тС}$ , для возникновения условий гипоксии на этих глубинах содержание органического вещества должно увеличиться еще на  $230 \text{ тС}$ . При этом поступить в залив со стоком талых вод может  $28 \text{ тС}$ , а образуется в водах залива около  $150 \text{ тС}$ . Как видно из полученных результатов, количество аллохтонного и автохтонного органического вещества, которое может поступить в залив, меньше концентраций, способных привести к возникновению условий гипоксии на глубинах более  $100 \text{ м}$ . Кроме того, количество органического вещества, которое необходимо “добавить”, почти в 3 раза превышает его рассчитанное содержание в глубинных слоях. Учитывая относительно небольшую изменчивость гидрохимических параметров в глубинных слоях залива, наличие стратификации и достаточно свободный обмен между заливом и прибрежной зоной в верхних слоях, возникновение условий, способных привести к такому резкому увеличению содержания органики в придонных слоях, маловероятно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, несмотря на наличие относительно неглубоких проходов, водообмен с открытой частью моря в верхних слоях практически не затруднен, а глубина проходов у острова Камни, вероятно, несколько превосходит предполагаемую по картографическим материалам. Кроме этого, обновление глубинных вод в заливе возможно, и могут существовать различные механизмы этого процесса. Так, кроме конвективного перемешивания, обновление глубинных вод в заливе Благополучия может происходить в результате поднятия более плотных вод в прибрежной зоне при апвеллинге. Стехиометрические расчеты по имеющимся данным, показали, что возникновение гипоксии в глубинных слоях залива Благополучия невозможно, по крайней мере при современных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РГО (проект № 13-05-41372\_полевые исследования) и РНФ (проекты № 14-17-00681 и № 14-50-00095, лабораторная обработка и обобщение гидрофизических и гидрохимических материалов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А. Экологическое эхо холодной войны в морях Российской Арктики. М: ГЕОС, 2000. 306 с.

2. Гулин М.Б. К изучению роли гипоксии и аноксии в жизни морских эукариот // Морск. экологич. журн. 2012. Т.11. № 1. С. 81–98.
3. Зацепин А.Г., Морозов Е.Г., Пака В.Т. и др. Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 г.// Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 683–697.
4. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 683–697.
5. Маккавеев П.Н., Стунжас П.А., Мельникова З.Г. и др. Гидрохимическая характеристика вод западной части Карского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 730–739.
6. Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Хлебонашев П.В. Поверхностный сток биогенных элементов с берега залива Благополучия (архипелаг Новая Земля) // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 610–617.
7. Новая Земля / Ред. Боярский П.В. М.: Европейское издание-Paulsen, 2009. 410 с.
8. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Ред. Сапожников В.В. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
9. Русанов В.П., Васильев А.Н. Распространение речных вод в Карском море по данным гидрохимических определений // Тр/ ААНИИ. 1976. Т. 323. С. 188–196.
10. Сапожников В.В., Аржанова Н.В., Мордасова Н.В. Гидрохимические параметры в океане и их практическое использование // Мировой океан. Т. 2: Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. М.: Научный мир, 2014. С. 111–129.
11. Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. Бордовский О.К., Чернякова А.М. М.: ИО АН СССР, 1992. 200 с.
12. Стунжас П.А., Бородкин С.О. Гидрохимические критерии обмена поверхностных и глубинных вод Белого моря // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 189–198.
13. Staalström A., Bjerkgeng B., Yakushev E., Christie H. Water exchange and water quality in Hunnbunn – Evaluation of dredging in the Thalbergsund with regard to improved water quality. 2009. NIVA Rapport № 5874-2009. 51.

## Hydrochemical and Hydrological Regimes Features of the Blagopoluchiya Bay (Novaya Zemlya)

S. V. Stepanova, A. A. Nedospasov

In the article the results of hydrophysical and hydrochemical research of Blagopoluchiya Bay (Arch. Novaya Zemlya) that were carried out in the complex IO RAS expeditions to the Kara Sea in 2007, 2013 and 2014 are given. The paper is focused on the analysis of the Ob and Yenisei rivers and melt water runoff from the shores of the New Earth influence on hydrophysical and hydrochemical structure of the Gulf waters, analysis of waters exchange processes between the Gulf and adjacent waters and renewal of deep (more than 100 m) Gulf waters. The evaluation of the stagnation possibility in the deep layers of the Gulf was made.