

**Рис. 5.1.11.** Среднемесячные распределения поверхностной ТПМ ( $^{\circ}\text{C}$ ) (а) и дневной экспозиции ФАР,  $\text{Э}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  (б) с мая по август 2016 г.

Приходящая на поверхность моря солнечная радиация оказывает заметное влияние на температуру поверхностного слоя (ТПМ) средней части Баренцева моря. Если в мае–июне увеличение ТПМ явно связано

с поступлением теплых атлантических вод с Норвежским течением, то в июле–августе положение более теплых вод соответствует области повышенных значений ФАР (больше  $35 \text{ Э}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ ) на июльской карте.

## 5.2. Вертикальная структура водной толщи Баренцева моря по оптическим данным

*В.И. Буренков, В.А. Артемьев*

*Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва*

В соответствующем разделе рассматриваются вертикальные распределения показателя ослабления света морской водой в различных районах Баренцева моря. Полученные за последнее время данные свидетельствуют о значительной пространственно-временной изменчивости оптических свойств. В частности выделяется район, подверженный влиянию речного стока (Печорской море). Аномально высокими значениями показателя ослабления отличаются районы, связанные с цветением кокколитофорид. Имеется ряд особенностей, связанных с поступлением Атлантических вод в Баренцево море. Показана тесная связь между показателем ослабления и концентрацией взвеси. Получено соответствующее уравнение регрессии.

**Ключевые слова:** показатель ослабления света, оптические свойства, кокколитофориды, взвесь.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(19)

### ВВЕДЕНИЕ

Измерение показателя ослабления света морской водой  $S$  и его вертикального распределения – один из наиболее распространенных видов гидрооптических наблюдений, поскольку величина  $S$  в значительной степени определяет процессы распространения оптического излучения в водной толще. Учитывая высокое пространственное разрешение измерите-

лей вертикальной структуры показателя ослабления, данные по  $S$  широко используются для сопоставления с результатами измерений STD зондов, что особенно ценно при оценках ситуации во фронтальных зонах, цветениях фитопланктона и зонах, подверженных воздействию пресноводного стока. Величина показателя ослабления тесно связана с концентрацией морской взвеси и может использоваться для

экспрессной оценки ее пространственного распределения, особенно в районах, подверженных влиянию речного стока.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерения вертикальных профилей распределения показателя ослабления света  $S(z)$  в Баренцевом море проведены в 13 и 14 рейсах НИС «Академик Сергей Вавилов» (1998 г.), в 48 (2001 г.) и 127 (2014 г.) рейсах НИС «Профессор Штокман», 62 (2015 г.), 65 (2016 г.), 68 (2017 г.) и 71 (2018 г.) рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш». Вначале измерения выполнялись с помощью погружаемых зондов-прозрачномеров «Дельфин» и «Паром», разработанных в Лаборатории оптики океана ИО РАН. В 2005 г. были разработаны малогабаритные автономные прозрачномеры ПУМ, а затем ПУМ-А [Artemiev et al., 2005; Артемьев и др., 2008]. Для ПУМ-А была разработана кювета, которая устанавливалась в измерительный канал – появилась возможность использовать прибор в составе судовой проточной системы и проводить измерения показателя ослабления проб морской воды на ходу судна. Все приборы построены по двухканальной оптической схеме, что позволило минимизировать аппаратные погрешности и температурный дрейф. Измерения проводятся на длине волны 530 нм, максимальная глубина погружения 200 м. Погрешность измере-

ния показателя ослабления  $0.02 \text{ м}^{-1}$ , глубины – 0.1 м, температуры –  $0.1^\circ\text{C}$ . Отработана методика интеркалибровки прозрачномеров ПУМ и ПУМ-А.

Концентрация взвеси определялась путем фильтрации проб воды (диаметр фильтра 0.45 мкм) с последующим взвешиванием фильтров. Отбор проб на взвесь производился практически одновременно с зондированием прозрачномером.

### ВЕРТИКАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА

Карта измерений показателя ослабления света в Баренцевом море за весь период наблюдений показана на рис. 5.2.1.

#### Кольский разрез

Кольский квазиширотный разрез по  $41^\circ$  в. д. выполнялся в 14 рейсе НИС «Академик Сергей Вавилов» в 1998 г. Он простирался от побережья Кольского полуострова на юге (ст. 1170,  $68^\circ 14'$  с. ш.,  $41^\circ 1'$  в. д.) до границы плавучих льдов на севере (ст. 1213,  $78^\circ 45'$  с. ш.,  $41^\circ$  в. д.). Расстояние между станциями составляло около 15 миль. Распределение показателя ослабления света на этом разрезе показано на рис. 5.2.2.

В целом, величины показателя ослабления на разрезе изменяются в относительно небольших пределах  $0.2\text{--}0.5 \text{ м}^{-1}$  в поверхностных слоях и  $0.1\text{--}0.2 \text{ м}^{-1}$  на глубинах  $>50$  м. Исключение составляют значения  $S$

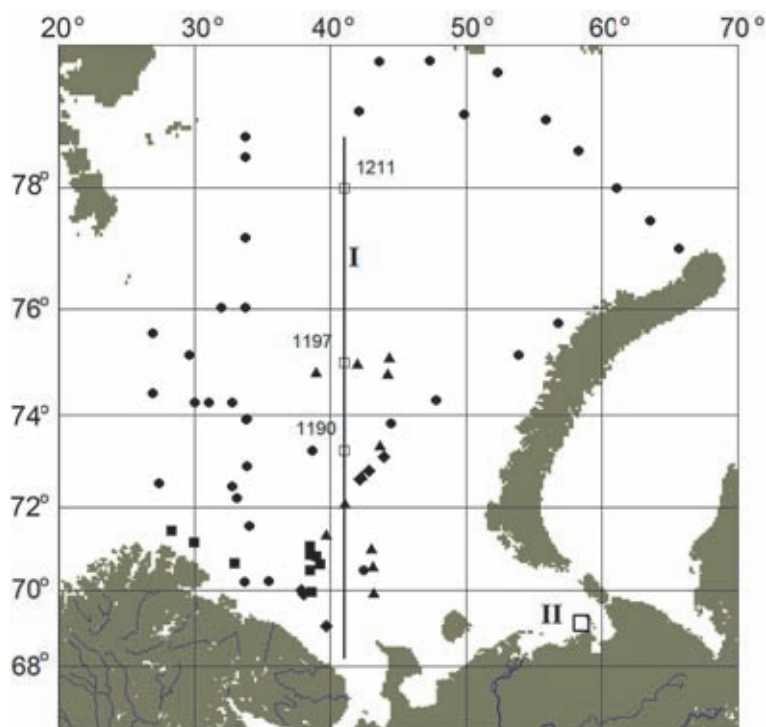
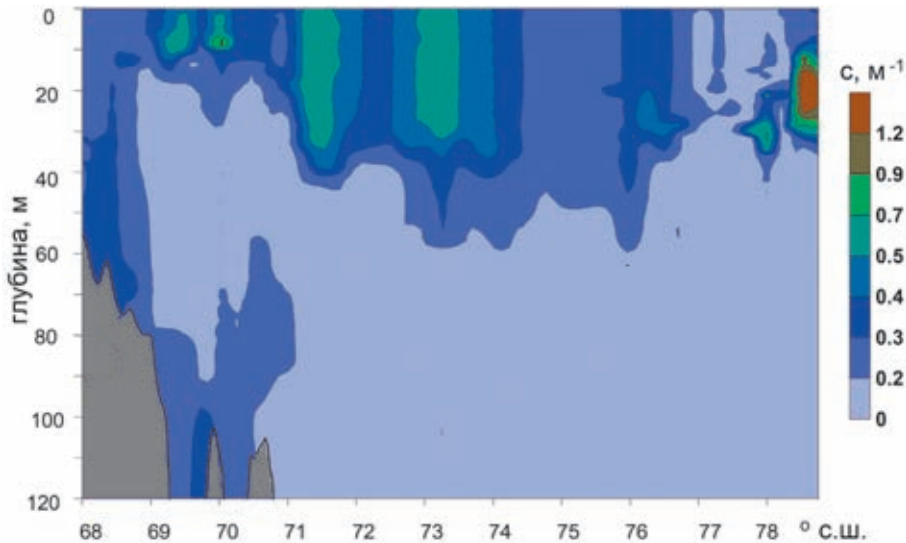


Рис. 5.2.1. Карта станций, выполненных за все время измерений в Баренцевом море.

I – Кольский квазиширотный разрез, II – полигон «Варандей», рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш»: ▲ – 62, ■ – 65, ● – 68, ◆ – 71



**Рис. 5.2.2.** Распределение показателя ослабления света на широтном разрезе по 41° в. д. от побережья Кольского полуострова на юге до границы плавучих льдов на севере. 14 рейс НИС «Академик Сергей Вавилов»

в самой северной части разреза на границе плавучих льдов, где на глубинах 20–40 м наблюдается интенсивный слой пониженной прозрачности с величинами  $C$  свыше  $1.5 \text{ м}^{-1}$ . Отметим, что подобная картина наблюдалась в море Лаптевых в 1991 г. [Буренков и др., 1997]. Соответствующий профиль  $C$  для Баренцева моря показан на рис. 5.2.3, а.

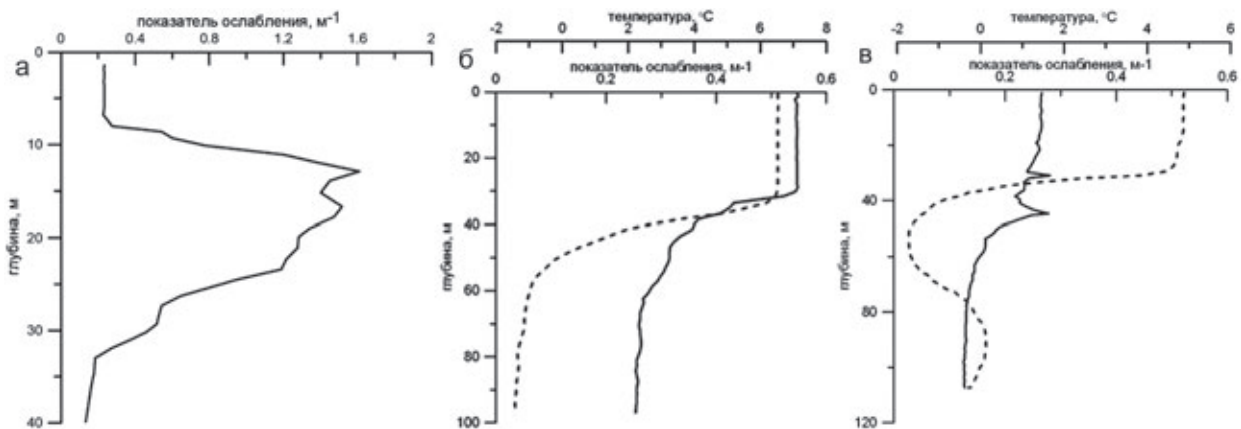
Несмотря на то, что изменения показателя ослабления в поверхностных слоях на разрезе относительно невелики, на рис. 5.2.2 хорошо видны широтные вариации  $C$ . Естественно предположить, что они связаны с распространением в Баренцевом море с запада ветвей Северо-Атлантического течения.

Отличия в вертикальных распределениях  $C$  на разных станциях Кольского разреза хорошо видны на рис. 5.2.3.

Как видно, значения  $C$  в поверхностном слое составляют  $0.55 \text{ м}^{-1}$  на ст. 1190 и  $0.27 \text{ м}^{-1}$  на ст. 1197, температуры  $6.2^\circ$  на ст. 1190 и  $4.8^\circ$  на ст. 1197.

#### ПОЛИГОН «ВАРАНДЕЙ»

Измерения на полигоне «Варандей» выполнялись в 13 рейсе НИС «Академик Сергей Вавилов» в 1998 г. в Печорском море. Под полигоном понимают область, прилегающую к стоку р. Печоры (единственной крупной реки, впадающей в Баренцево море) и расположенную в юго-восточной части моря. Здесь были выполнены измерения на нескольких полигонах в различных участках Печорского моря. В большинстве случаев измерения показали наличие мутного приповерхностного слоя (величина  $C$  достигала значений свыше  $4 \text{ м}^{-1}$ ); с увеличением глубины вели-



**Рис. 5.2.3.** Вертикальные распределения показателя ослабления света (сплошная линия) и температуры воды (пунктирная линия) на станциях Кольского разреза:

а – северная часть разреза, ст. 1211; б, в – средняя часть разреза, ст. 1190 и 1197 соответственно (см. рис. 5.2.1)

чина  $S$  уменьшалась, иногда отмечались промежуточные слои пониженной прозрачности. Мутность воды обычно уменьшалась при удалении от дельты Печоры. Такая картина типична для районов, подверженных влиянию речного стока, хотя, вследствие небольших глубин в Печорском море, стратификация здесь не столь четко выражена как в районах стока Оби, Енисея и Лены.

На рис. 5.2.4 показано распределение по глубине и в приповерхностном слое показателя ослабления света на полигоне «Варандей», наиболее близком к устью Печоры.

На рис. 5.2.4, а хорошо видно, что на самой южной части разреза (ст. 1095) наиболее мутные воды располагаются в приповерхностном слое толщиной около 8 м. Величина  $S$  здесь составляет около  $4 \text{ м}^{-1}$ . Стратификация показателя ослабления относительно слабая – значения показателя ослабления у дна лишь немного меньше поверхностных значений. Севернее воды высокой мутности в поверхностном слое располагаются вплоть до ст. 1097, хотя на отдельных участках разреза они перемежаются с водами более высокой прозрачности.

Севернее ст. 1097 наблюдается фронтальная зона, где резко понижаются значения  $S$  на всех глубинах (наличие этой зоны подтверждается гидрологическими данными). На самой северной части разреза (ст. 1098) величины показателя ослабления на всех глубинах не превосходят  $1.5 \text{ м}^{-1}$ .

На рис. 5.2.4, б показано распределение показателя ослабления в приповерхностном слое на этом же полигоне. В целом представленное распределение  $S(z)$  соответствует показанному на рис. 5.2.4, а.

### ВЕРТИКАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА В ПЕРИОД ЦВЕТЕНИЯ КОККОЛИТОФОРИД

В летний период в Баренцевом море наблюдается цветение кокколитофорид [Kopelevich et al., 2008] – специфического вида водорослей (диаметр около 10 микрон), характеризующихся наличием карбонатного «панциря» (кокколитов). Вертикальная структура показателя ослабления и связанных с ним параметров в областях цветения кокколитофорид пока изучена недостаточно. Ниже приводятся некоторые результаты таких исследований.

В 62 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (август 2015 г.) были выполнены измерения профилей  $S(z)$  на нескольких станциях, где по спутниковым данным наблюдались области цветения кокколитофорид. Вертикальные распределения показателя ослабления и температуры на этих станциях показаны на рис. 5.2.5. На всех станциях измерения выполнялись в областях, где по спутниковым данным концентрация кокколитофорид  $N_{\text{coc}}$  превышала 1 млн кл./л.

Величины показателя ослабления света у поверхности для приведенных станций составляли 2.1, 2.5, 1.1, 2.5  $\text{м}^{-1}$  соответственно, причем вертикальная структура профилей  $S(z)$  на этих станциях различалась весьма значительно. Как видно, на ст. 5194 значения показателя ослабления у поверхности заметно меньше, чем на других (цветения кокколитофорид здесь не было).

Если на ст. 5192 поверхностный квазиоднородный слой относительно небольшой (около 10 м), то на ст. 5195 от достигает 25 м. Интересно отметить также наличие на ст. 5193 слоя пониженной прозрачности

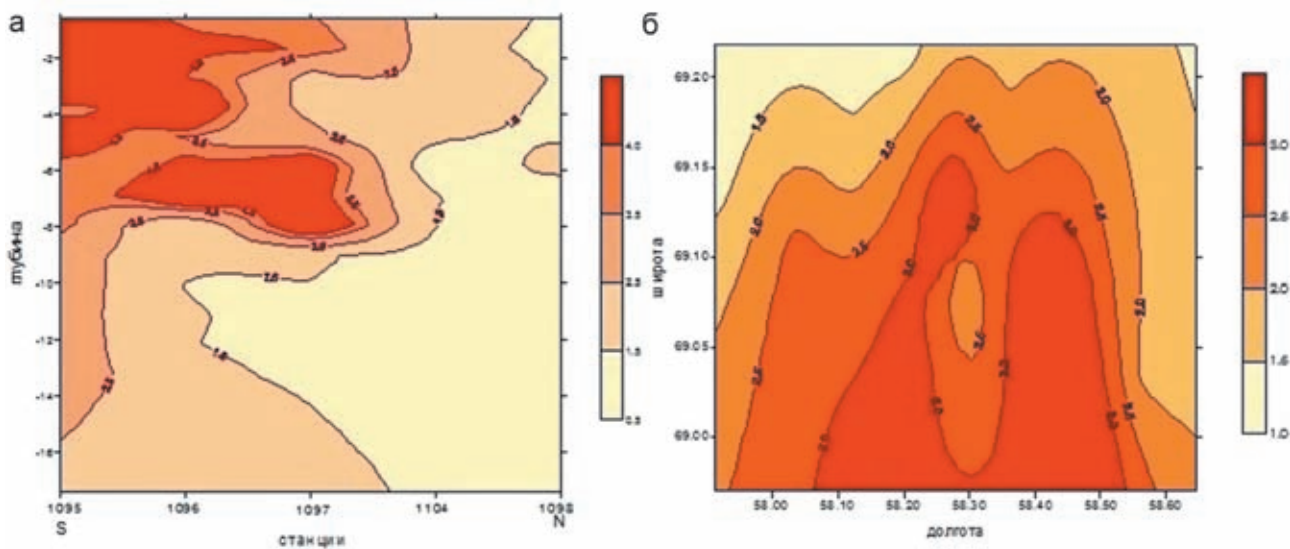


Рис. 5.2.4. Распределение по глубине (а) и в приповерхностном слое (б) показателя ослабления света на полигоне «Варандей», наиболее близком к устью р. Печоры

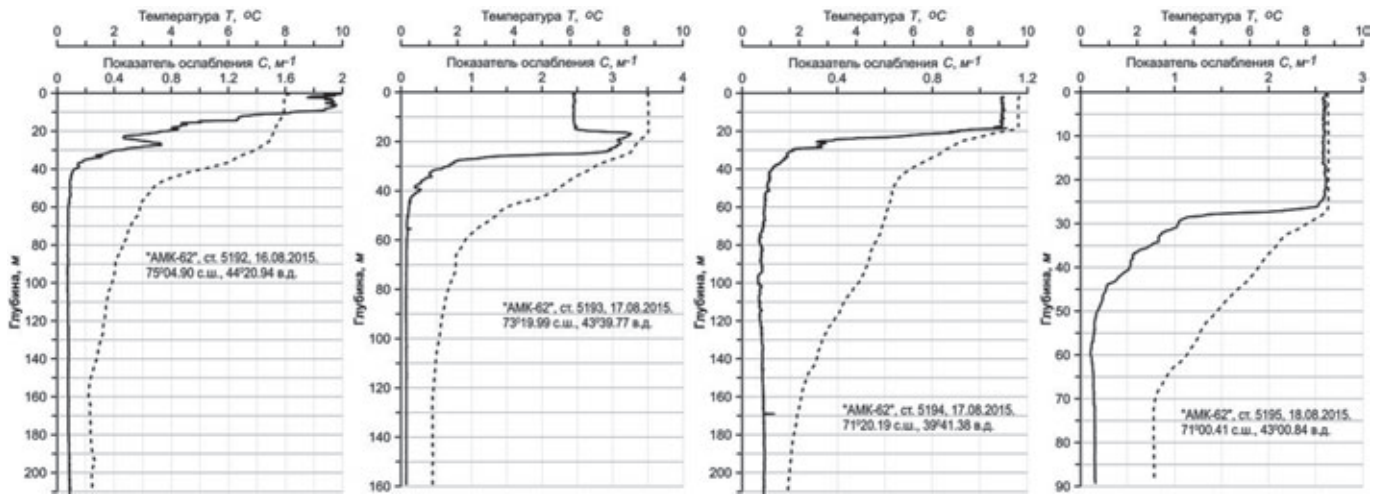


Рис. 5.2.5. Вертикальные распределения показателя ослабления и температуры на разных станциях в области цветения кокколитофорид (62 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2015 г.)

на глубине около 20 м. Он, по-видимому, связан не с цветением кокколитофорид, а с наличием другого хлорофиллосодержащего вида фитопланктона, поскольку концентрация хлорофилла в нем достигает 2.1 мкг/л при поверхностном значении 1.25 мкг/л, что не типично для кокколитофорид.

Интенсивное цветение кокколитофорид было зарегистрировано и во время 65 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» вблизи побережья Кольского полуострова (июль 2016 г.). Здесь были выполнены зондирования прозрачномером на трех станциях. Результаты измерений приведены на рис. 5.2.6.

Здесь по спутниковым данным были зафиксированы чрезвычайно большие концентрации  $N_{\text{coc}}$  (до 10 млн кл/л), при этом концентрация хлорофилла была относительно небольшой (0.7–1.5 мкг/л). Это связано с тем, что удельное содержание хлорофилла в клетках кокколитофорид относительно невелико. Обращает на себя внимание наличие мощного максимума показателя ослабления на ст. 6533 на глубине 20 м. По-видимому, наличие этого слоя (также как и на рис. 5.2.6, ст. 5193) связано со скоплением хлорофиллосодержащей взвеси.

Во время 68 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (июль 2017 г.) область цветения кокколито-

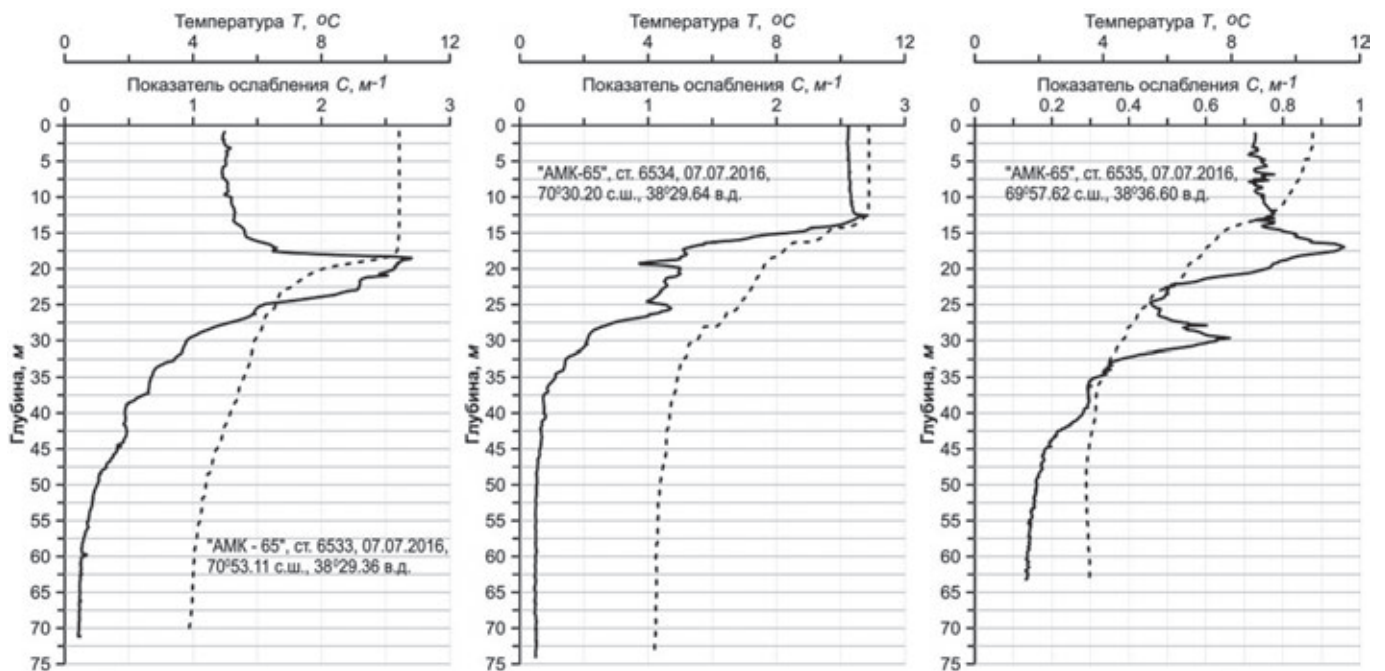


Рис. 5.2.6. Вертикальные распределения показателя ослабления света и температуры на разных станциях в области цветения кокколитофорид (65 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2016 г.)

форид вплотную прилежала к побережью Кольского полуострова. Концентрация кокколитофорид здесь заметно превышала 1 млн кл/л; вертикальные распределения показателя ослабления в этой области показаны на рис. 5.2.7 (ст. 5579–5580).

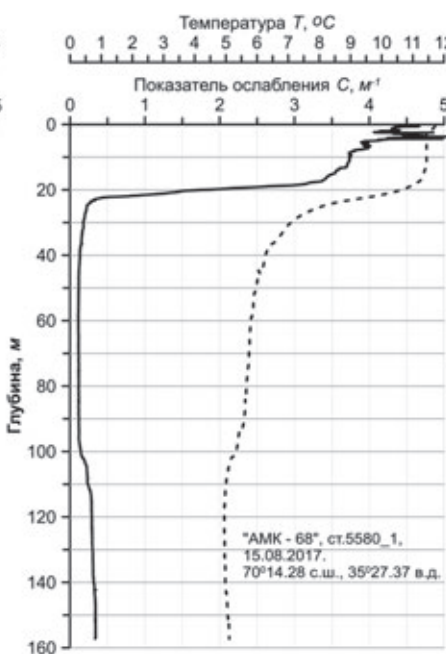
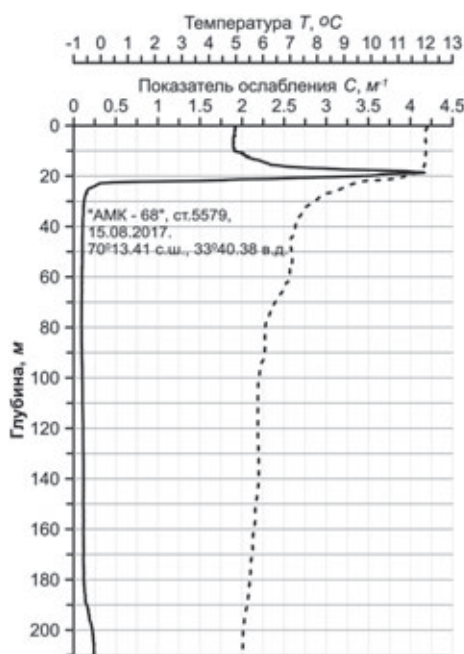
#### ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ

Наиболее представительный материал по одно-временным измерениям концентрации взвеси  $TSM$  и показателя ослабления  $C$  получен в 68 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (179 точек, 2017 г.), 13 и 14 рейсах НИС «Академик Сергей Вавилов» (98 точек, 1998 г.). Незначительное число измерений было выполнено в 62 (2015 г.) и 65 (2016 г.) рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш».

На рис. 5.2.8 показаны графики, иллюстрирующие связь показателя ослабления  $C$  с концентрацией взвеси  $TSM$  (Total Suspended Matter) по данным 13 и 14 рейсов НИС «Академик Сергей Вавилов» в линейном и логарифмическом масштабах. Соответствующее уравнение линейной регрессии (рис. 5.2.8, а) имеет вид

$$TSM = 0.84 C - 0.012, \quad (5.2.1)$$

где  $TSM$  измеряется в мг/л,  $C$  – в  $m^{-1}$ . Величина коэффициента детерминации  $r^2$  составляет 0.88 (количество совместных измерений  $n=98$ ). Средняя погрешность определения концентрации взвеси по этому уравнению составляет около 30%. Для логарифмической зависимости рассматриваемых параметров коэффициент детерминации такой же, как и для линейной.



Соответствующее уравнение регрессии по данным 68 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2017 г.) имеет вид:

$$TSM = 0.70 C + 0.03. \quad (5.2.2)$$

Графики линейной и логарифмической зависимости между рассматриваемыми параметрами показаны на рис. 5.2.9. Величина коэффициента детерминации  $r^2$  составляет 0.91 ( $n=179$ ).

Различия между формулами (5.2.1) и (5.2.2) носят региональный характер. Надо отметить, что наклон в уравнениях линейной регрессии определяется, в первую очередь, данными с высокими значениями показателей ослабления и концентрации взвеси. Как видно из сравнения рисунков 5.2.8 и 5.2.9, в первом случае таких точек было гораздо больше, чем во втором, и определялись они разными факторами. Для (5.2.1) это значения, полученные на полигоне «Варандей» (рис. 5.2.4) и связанные со взвешенными частицами, выносимыми Печорой; для (5.2.2) – с кокколитофоридным цветением.

Уравнение регрессии между  $TSM$  и  $C$ , рассчитанное только по данным измерений в области цветения кокколитофорид имеет вид:

$$TSM = 0.65 C + 0.14 (n=21, r^2=0.75). \quad (5.2.3)$$

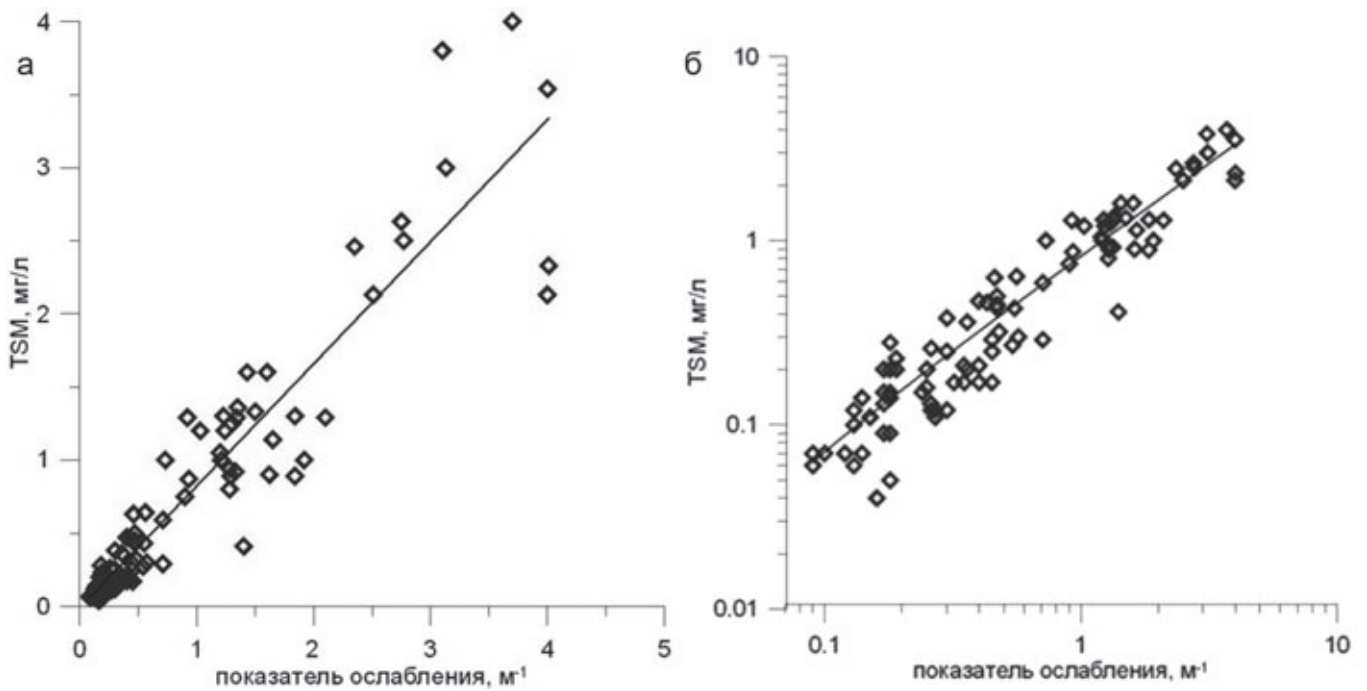
Различие между уравнениями (5.2.1) и (5.2.3) объясняется главным образом отличиями оптических свойств частиц, выносимых речным стоком, и кокколитофоридными частицами.

Мы также рассчитали уравнение регрессии для общего массива, включающего данные 13 и 14 рейсов НИС «Академик Сергей Вавилов» и 62, 65 и 68 рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш»:

$$TSM = 0.74 C + 0.02 (n=318, r^2=0.84). \quad (5.2.4)$$

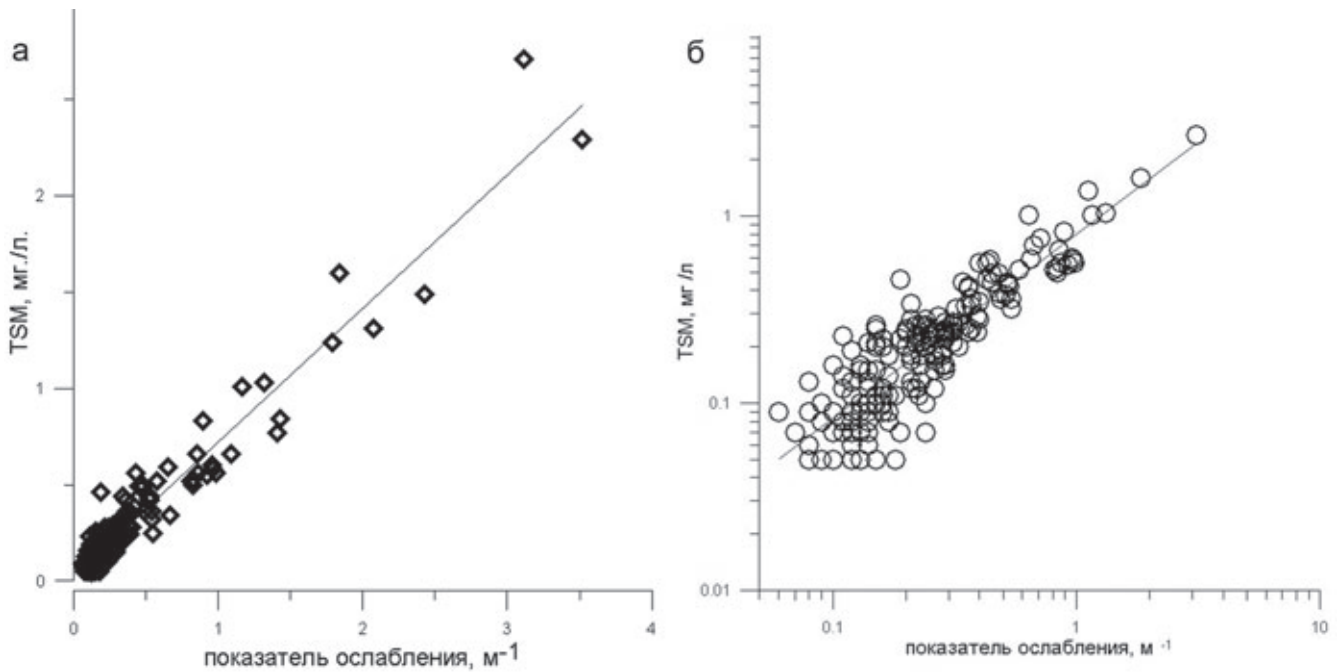
Выполненные измерения вертикальных профилей показателя ослабления свидетельствуют о значительной пространственно-

**Рис. 5.2.7.** Вертикальные распределения показателя ослабления света и температуры на разных станциях в области цветения кокколитофорид вблизи Кольского полуострова (68 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2017 г.)



**Рис. 5.2.8.** Связь между показателем ослабления света и концентрацией взвеси по данным 13 и 14 рейсов НИС «Академик Сергей Вавилов» в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах.

Сплошная линия – уравнение регрессии



**Рис. 5.2.9.** Связь между показателем ослабления света и концентрацией взвеси для Баренцева моря по данным 68 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2017 г.) в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах.

Сплошная линия – уравнение регрессии

временной изменчивости оптических свойств морской воды. Причины этого весьма многообразны. Это и районы, подверженные влиянию речного стока в юго-восточной части моря (Печорское море), и

районы цветения кокколитофорид, которые регулярно наблюдаются в летний период. Также имеются особенности, связанные с поступлением в Баренцево море атлантических вод. Вышеперечисленные осо-

бенности оказывают влияние и на полученные связи между показателем ослабления и концентрацией взвеси.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим главные результаты современных оптически исследований в Баренцевом море.

Прежде всего, это практическое использование данных спутниковых наблюдений, позволившее получать (правда, при благоприятных погодных условиях) мгновенные изображения всего моря или, по крайней мере, большей его части. Региональные алгоритмы обработки спутниковых данных, разработанные на основе данных судовых измерений в экспедициях Института океанологии, дали возможность с приемлемой точностью рассчитывать по спутниковым данным абсолютные величины основных биооптических характеристик поверхностного слоя, таких как концентрация хлорофилла  $Chl$ , показатель рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}$ , параметры кокколитофоридных цветений. Построены карты среднемесячных распределений указанных характеристик для теплого сезона с 1998 по 2018 гг. и диаграммы межгодовых изменений среднемесячных значений этих величин для трех выделенных в Баренцевом море субрегионов: Северного, Среднего и Южного.

Разработаны алгоритмы для расчета по спутниковым данным спектральных распределений солнечной радиации видимого диапазона на поверхности и в поверхностном слое вод, а также фотосинтетически активной радиации (ФАР) и объемного поглощения.

Основной фактор, определяющий количество солнечной радиации на поверхности моря в течение су-

ток (дневную экспозицию), – облачность. Как пример, при одном и том же значении ФАР на верхней границе атмосферы значения дневной экспозиции на поверхности моря, в зависимости от облачности, изменялись более чем в 2.5 раза. Кокколитофоридные цветения также оказывают существенное влияние на проникновение солнечной радиации в водную толщу; например, кокколитофоридное цветение с концентрацией клеток 2.6 млн кл./л увеличивает альбедо водной толщи до 8% (при отсутствии цветения оно меньше 1%) и уменьшает величину ФАР на глубине 5 м более чем на 40%. Солнечная радиация оказывает заметное влияние на температуру поверхностного слоя в средней части Баренцева моря, наряду с поступлением теплых атлантических вод с Норвежским течением.

За период с 1998 по 2018 гг. получен большой массив данных измерений вертикальных профилей показателя ослабления света одновременно с температурой воды. Измерения, выполненные на Кольском широтном разрезе по 41° в. д. от побережья Кольского полуострова до границы плавучих льдов, на полигоне «Варандей» в Печорском море, в четырех рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2015–2018 гг., охватили практически все Баренцево море и показали значительное разнообразие вертикальной структуры верхнего слоя, связанное с проявлением различных факторов: речного стока в юго-восточной части моря, поступлением атлантических вод, кокколитофоридными цветениями.

Выведены уравнения для оценки концентрации взвеси по данным измерений показателя ослабления света. Величина коэффициента детерминации для связи между этими величинами составляет 0.84–0.91 (в области кокколитофоридных цветений 0.75).