

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗВЕСИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ШЕЛЬФОВЫХ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

науч. сотр. Р.Е.ВЛАСЕНКОВ, д-р. физ.-мат. наук А.П.МАКШТАС

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: vre@otto.nw.ru

*На основе данных экспериментальных исследований, выполненных в доступной для плавания акватории шельфовых морей Российской Арктики на борту НИС «Иван Киреев» и НИС «Иван Петров» в 2003–2008 гг, а также архивных данных получено пространственное распределение взвешенного вещества в поверхностном слое и его пространственно-временная изменчивость.*

*Ключевые слова:* Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море, прозрачность, взвесь, мутность.

### ВВЕДЕНИЕ

Непременными компонентами естественных вод являются минеральная и органическая взвеси, объединенные общим названием гидрозоль. Морская взвесь чрезвычайно разнообразна. Это и терригенные частицы, приносимые в море реками и ветрами, и клетки фитопланктона, бактерии, детрит (главным образом – остаточный продукт разложения клеток фито- и зоопланктона, а также макрофитов), частицы антропогенного происхождения, вулканического пепла и др. Однако основная масса гидрозоль состоит из двух компонентов – терригенного и биогенного. Основным поставщиком взвеси в Мировой океан является фитопланктон, его доля составляет примерно 80 % всего взвешенного вещества.

Концентрация взвешенных частиц связана с сезонными факторами и режимом стока, зависит от пород, слагающих русло рек, а также от антропогенных факторов, таких, как сельское хозяйство, горные разработки и т.п. Взвешенные частицы влияют на прозрачность воды и, соответственно, на перераспределение солнечной радиации и радиационный прогрев верхнего слоя моря, состав растворенных компонентов поверхностных вод, адсорбцию токсичных веществ, а также на состав и распределение отложений и скорость осадкообразования.

Оптические характеристики вод арктических морей во многом определяются концентрацией и свойствами взвешенных частиц. Это позволяет использовать их при изучении перераспределения и транспорта взвесей [Иванов и др., 2005; Лисицын, 1994; Лисицын и др., 2000; Матюшенко, 2004]. Исследование пространственно-временного распределения последних, в свою очередь, представляет собой одну из важнейших проблем седиментологии [Айбулатов и др., 1999; Дударев и др., 2007; Anoshkin et al., 1995], особенно принимая во внимание то обстоятельство, что мелководные шельфы

арктических морей являются одним из основных источников взвешенных частиц, переносимых льдами в Арктическом бассейне [Eicken et al., 2000; Reimnitz et al., 1995; Wegner et al., 2004].

Прозрачность характеризует свойство физической среды ослаблять распространяющееся в ней электромагнитное излучение оптического диапазона. Пространственное и временное распределение оптических свойств воды определяется распределением концентрации растворенного органического вещества и взвеси. Таким образом, прозрачность – это величина, косвенно характеризующая количество частиц взвесей минерального и органического происхождения в океанической воде.

Основной задачей данной работы является получение максимально полных данных о пространственно-временной изменчивости концентрации взвеси в акваториях шельфовых морей Российской Арктики. Для ее выполнения были использованы дынные комплексных исследований, выполненных в 2003, 2004, 2007 и 2008 гг., а также созданный в ААНИИ электронный архив данных о глубине исчезновения диска Секки [Власенков и др., 2011], охватывающий период с 1956 по 1985 г.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период экспедиций 2003, 2004, 2007 и 2008 гг. работы велись в открытых для плавания акваториях морей Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское (см. рис. 1а). За это время были выполнены комплексные измерения гидрооптических характеристик морской воды на более чем 750 гидрологических станциях. Количественное представление архивной информации, полученной в период экспедиционных исследований, выполненных в основном ледовыми патрулями, отображено на рис. 1б.

При выполнении экспедиционных работ в 2003–2008 гг. использовался зонд «Sea-Bird SBE19plus» с долговременной памятью. С его помощью фиксировались такие параметры морской воды, как температура, соленость, флуоресценция, мутность. Исследование данных характеристик необходимо при изучении гидрооптических свойств морской воды, поскольку микроорганизмы, во многом их определяющие, могут существовать лишь в определенном диапазоне их концентраций, температур, обмена с внешней средой и разлагаются при несоответствии необходимых условий [Копелевич, 1981].

Дискретный пробоотбор выполнялся батометрами конструкции Нискина. Получение пробы взвеси осуществлялось методом фильтрации отобранного объема морской воды под вакуумом через мембранные поликарбонатные фильтры. Диаметр пор фильтров, согласно общепринятым представлениям о диапазоне размеров взвешенных частиц взвеси, составлял 0,45 мкм. После фильтрации фильтры в течение суток подвергались термической обработке в печи SNOL 58/350 при температуре 35 °С. В дальнейшем они взвешивались при помощи электронных весов фирмы Sartorius (модель LA230S).

Ранее полученная с помощью регрессионного анализа эмпирическая зависимость между мутностью, измеряемой в NTU ( $X$ , natural technical units), и концентрацией взвешенного вещества ( $C$ , мг/л) имеет вид:

$$C = 0,8228X - 0,0804.$$

Данная зависимость позволяет рассчитывать концентрацию взвешенного вещества с погрешностью 0,66 мг/л.

Для использования данных о глубине исчезновения диска Секки, на основе синхронных измерений, выполненных в период экспедиций в моря Лаптевых и

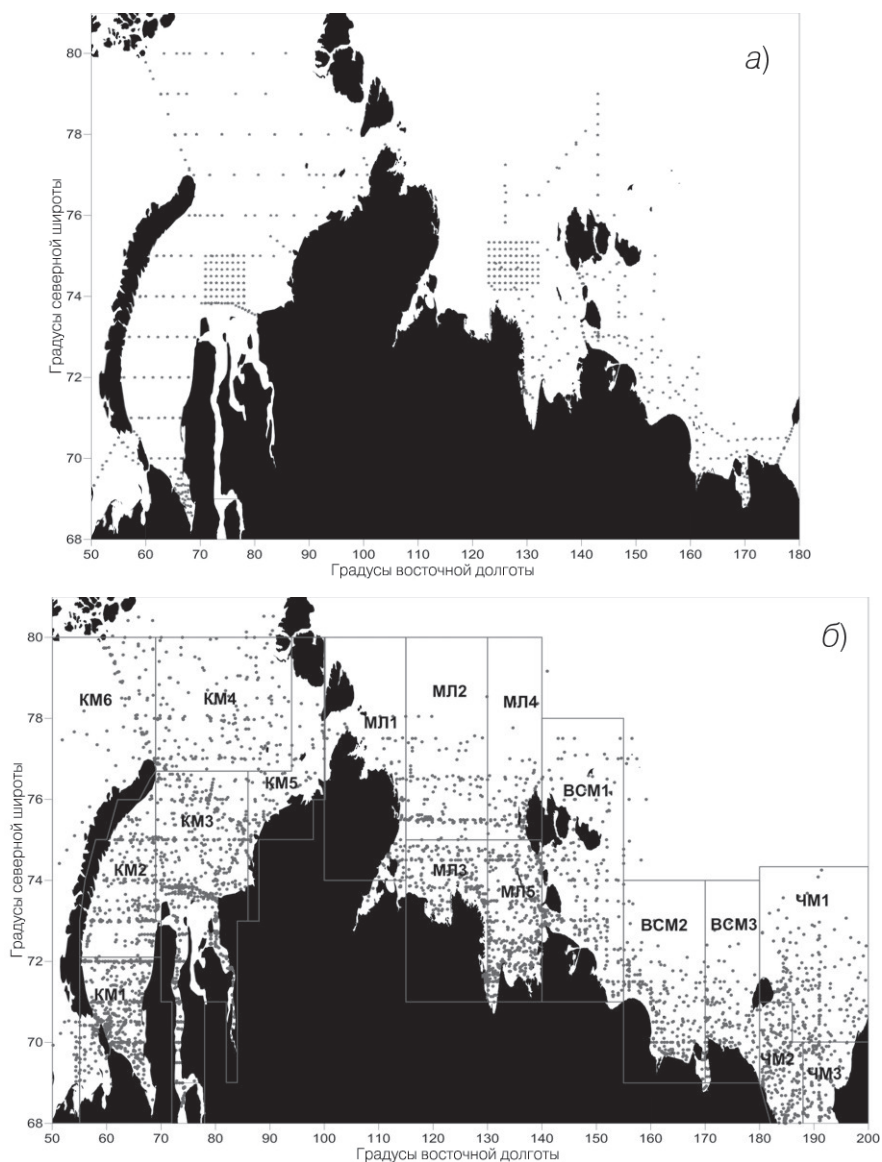


Рис. 1. Схема расположения комплексных гидрологических станций экспедиций г/с «Иван Киреев» в 2003 и 2004 гг. и г/с «Иван Петров» в 2007 и 2008 гг. (а) и освещенность района исследований данными наблюдений за диском Секки в период 1956–1985 гг. (б).

Восточно-Сибирское в 2003 и 2004 гг. была установлена следующая эмпирическая зависимость средней концентрацией взвешенных частиц  $C$  (мг/л) от глубины исчезновения диска Секки  $z_d$  (м):

$$C = 5,509z_d^{-0,704}.$$

Данное уравнение регрессии имеет погрешность аппроксимации  $\pm 0,54$  мг/л, и коэффициент корреляции составляет 0,91 [Власенков и др., 2011].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе полученных эмпирических зависимостей были выполнены оценки концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое исследуемых морей. Результаты этих расчетов для объединенных экспедиционных данных 2003, 2004, 2007 и 2008 гг. представлены на рис. 2. Кроме того, созданный электронный архив исторических наблюдений за глубиной исчезновения диска Секки позволил получить пространственно-временное распределение концентрации взвеси в поверхностном слое морей за почти тридцатилетний период (рис. 3).

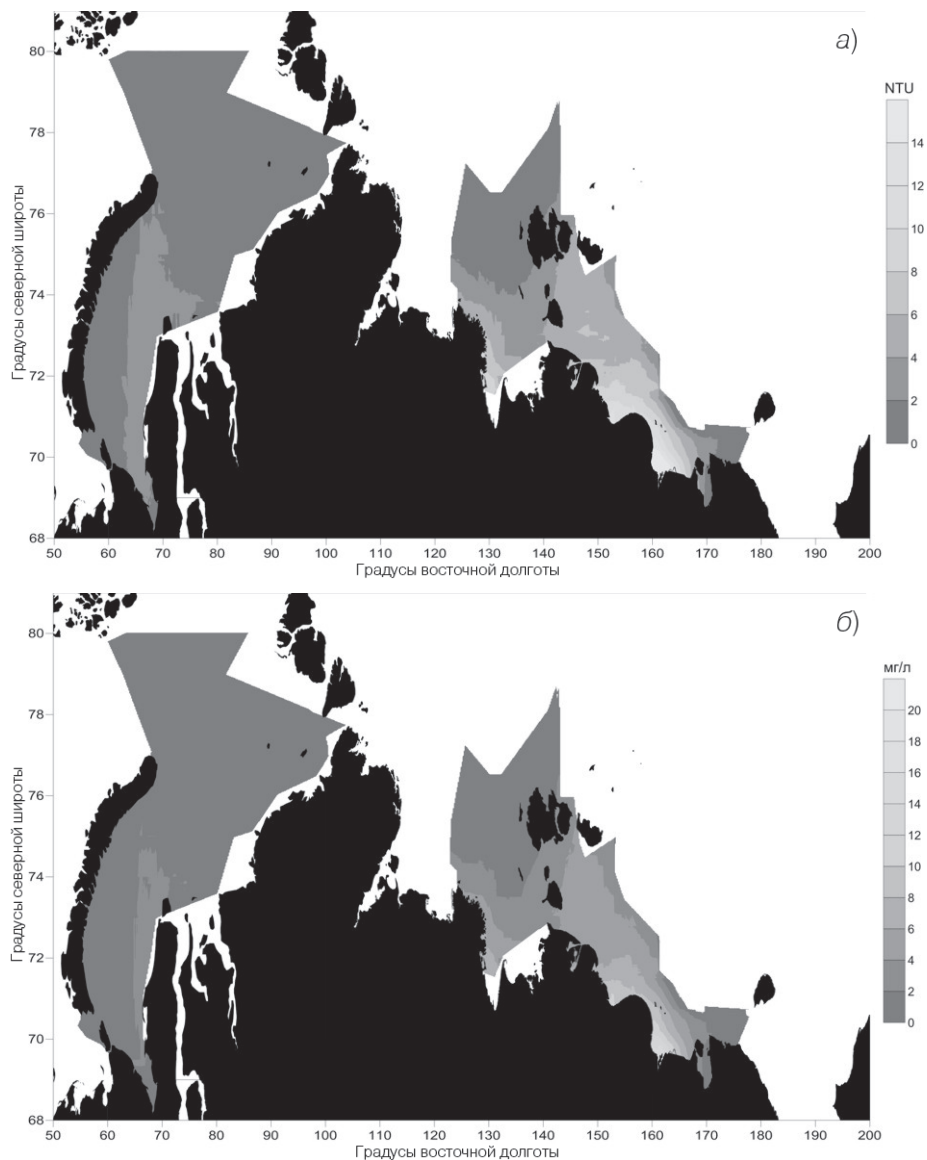


Рис. 2. Пространственно-временное распределение мутности воды (а) и расчетной концентрации взвешенного вещества (б) по данным экспедиций 2003–2008 гг.

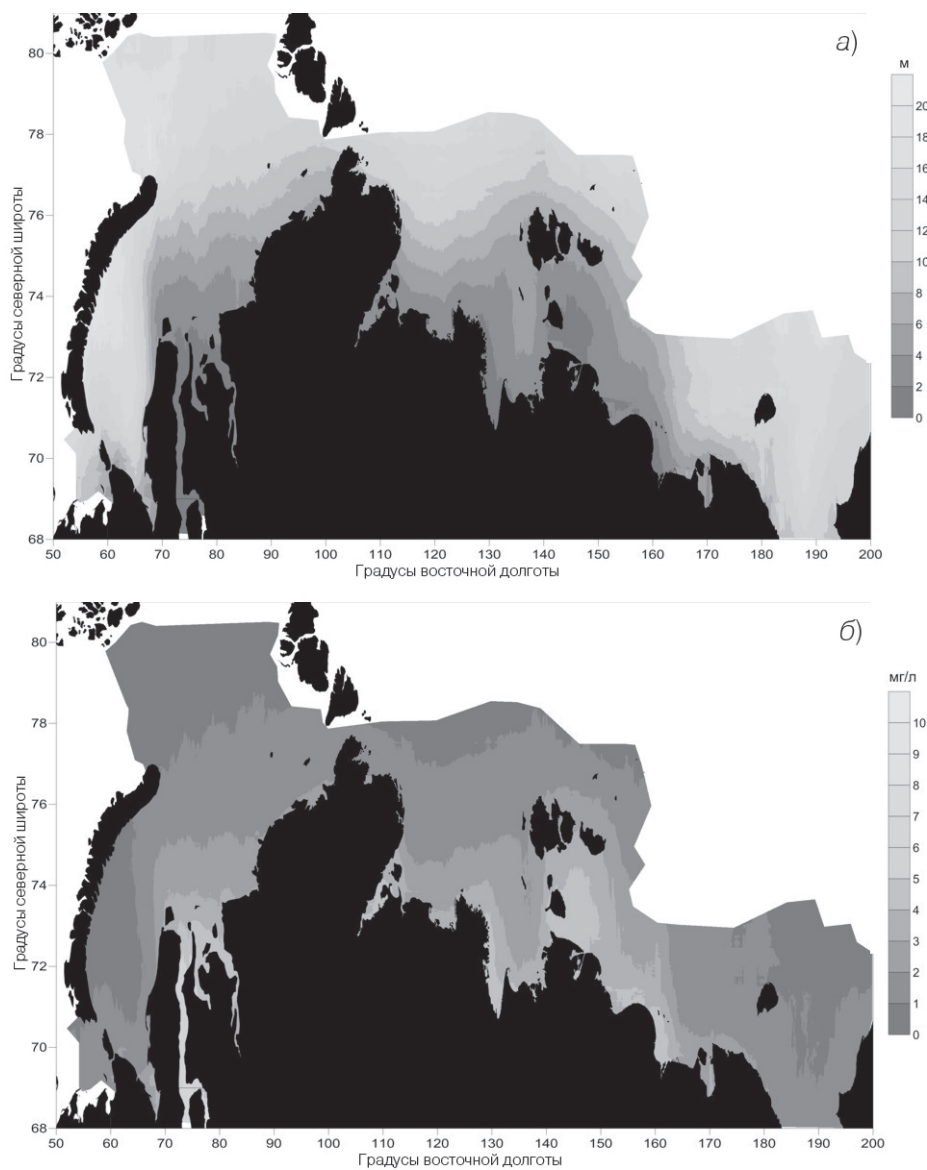


Рис. 3. Пространственно-временные распределения глубины исчезновения диска Секки (а) и расчетной концентрации взвешенного вещества (б) по историческим данным.

Как видно из рисунков, максимальные значения концентрации взвешенного вещества в приповерхностном слое достигаются в южных частях морей, то есть в областях, непосредственно прилегающих к береговой линии, и в устьевых зонах таких крупных рек, как Обь, Енисей, Лена, Колыма и Индигирка. Кроме того, максимумы концентрации взвеси отмечаются в районе Новосибирских островов. Данные распределения связаны как с интенсивным выносом взвесей речными водами, так и с процессами разрушения берегов, обусловленными таянием ледяных комплексов, выносом терригенного материала.

Таблица 1

## Значения концентрации взвеси в шельфовых морях Российской Арктики (мг/л)

Регион	Экспедиционные данные 2003–2004, 2007–2008 гг.			Исторические данные 1956–1985 гг.		
	Минимальные значения	Максимальные значения	Средние значения	Минимальные значения	Максимальные значения	Средние значения
Карское море	0,19	17,16	1,17	0,36	12,86	2,26
Море Лаптевых	0,18	34,46	1,75	0,62	8,97	2,77
Восточно-Сибирское море	0,35	26,88	3,57	0,45	10,50	2,95
Чукотское море	–	–	–	0,45	5,51	1,25

ла сгонными или отливными водами от побережья, а также ремобилизацией со дна уже осевшей взвеси в мелководных районах морей [Кулаков, 2008].

Обобщенные данные концентрации взвешенного вещества для каждого из шельфовых морей представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, средние значения концентрации взвесей по данным экспедиционных исследований 2000-х гг., за исключением Восточно-Сибирского моря, существенно меньше, чем по историческим данным, в то время как максимальные значения концентрации взвеси – существенно выше. Такие высокие оценки, скорее всего, обусловлены метеорологическими условиями, при которых проводились измерения. Так, экстремальные значения для Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей были зафиксированы в ходе экспедиций 2004 и 2007 гг., в период штормов. Данное обстоятельство, скорее всего, привело к перемешиванию слоев моря и увеличению концентрации взвеси за счет подъема частиц от придонного уровня к поверхности. При этом следует отметить, что измерения глубины диска в штормовых условиях не проводились.

Значения концентрации взвешенного вещества по районам морей Российской Арктики, осредненные по пятилетним периодам, и их аппроксимация линейными трендами представлены на рис. 4.

Как следует из рисунка, отрицательные и в основном незначимые тренды концентрации взвеси наблюдаются в северных районах исследуемых акваторий. В то же время в прибрежных районах наблюдается ее некоторое увеличение. Интересным представляется тот факт, что на фоне увеличения концентрации взвешенного вещества в большинстве прибрежных районов шельфовых морей имеется ярко выраженная обратная тенденция в центральных и восточных регионах Карского моря. Следует учитывать, что количество речных вод, поступающих в арктические моря, различно: в Карское море поступает в среднем около 55 % общего стока в четыре арктических моря, а характер распространения речных вод в море в значительной степени зависит от господствующих ветров и потому не одинаков в различные годы. Для Карского моря установлены западный, восточный и веерообразный варианты распространения речных вод [Герасимов и др., 1970]. Можно



Рис. 4. Тенденции межгодовой изменчивости концентрации взвеси в различных районах шельфовых морей Российской Арктики. На графиках по периметру рисунка приведены линейные тренды концентрации взвесей (мг/л) за период 1956–2008 гг.

предположить, что в Карском море для исследуемого временного промежутка наиболее ярко выражен западный вариант распределения вод.

Наибольшая изменчивость концентрации взвеси прослеживается в районах рек Лена и Колыма. В этих регионах отмечается более чем двукратное увеличение средней концентрации взвешенного вещества (от 1,2–1,7 до 4,6–4,9 мг/л) за прошедшие 60 лет.

Подводя итог данной работы, можно отметить, что натурные измерения, выполненные в последние годы, совместно с данными созданного электронного архива, позволили построить детальные карты пространственного распределения концентрации взвесей, глубины исчезновения диска Секки и мутности воды шельфовых морей Российской Арктики. Это дало возможность получить новые представления о пространственно-временной изменчивости указанных характеристик для каждого из морей. Анализ данных выявил неоднозначные тенденции многолетней изменчивости концентрации взвеси. В то же время существенное увеличение концентрации взвесей в приустьевых участках Лены и Колымы, а также большинстве прибрежных районов Восточно-Сибирского моря, вероятно, является свидетельством влияния ускоренной деградации береговых ледовых комплексов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Айбулатов Н.А., Матюшенко В.А., Шевченко В.П., Политова Н.В., Потехина Е.М.* Новые данные о поперечной структуре латеральных потоков взвешенного вещества по периферии Баренцева моря // *Геоэкология*. 1999. № 4. С. 526–540.

*Власенков Р.Е., Макитас А.П.* Гидрооптические характеристики морей Карского и Лаптевых // *Океанография и морской лед*. М.: Paulsen, 2011. С. 208–226.

*И.П.Герасимов и др.* Советская Арктика. М.: Наука. 1970. 156 с.

*Дударев О.В., Чаркин А.Н., Семилетов И.П., Боцул А.И., Космач Д.А.* Современное осадкообразование на приконтинентальном шельфе Восточно-Сибирского моря // *Дальневосточные моря России*. Кн. 2. Исследования морских экосистем и биоресурсов / Под. ред. В.П.Челомина. М.: Наука, 2007. С. 382–391.

*Иванов Б.В., Ионов В.В., Орбек Й.-Б.* Косвенный метод определения взвешенных частиц фьордов Западного Шпицбергена // *Комплексные исследования природы Шпицбергена*. Вып. 5. Сборник материалов Пятой международной конференции. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. С. 297–301.

*Кулаков М.Ю.* Циркуляция вод и перенос взвесей в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008. № 3 (80). С. 86–97.

*Копелевич О.В., Шифрин К.С.* Современные представления об оптических свойствах морской воды. М.: Наука, 1981. С. 4, 21–33.

*Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в Мировом океане. М.: Наука, 1994. 448 с.

*Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И.* Гидрооптика и взвесь арктических морей // *Оптика атмосферы и океана*. 2000. Т. 13. № 1. С. 70–79.

*Матюшенко В.А.* Пространственно-временная изменчивость гидрооптических характеристик Белого моря // *Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря*. Материалы IX международной конференции 11–14 октября 2004 г. Петрозаводск, Карелия, Россия. Петрозаводск. 2005. С. 218–223.

*Шулейкин В.В.* Физика моря. М.: Изд. АН СССР, 1953. С. 356–363, 628–638

*Anoshkin A.F., Popov I.E., Ushakov I.E.* TRANSDRIFT Shipboard Scientific Party. Hydrooptical measurements in the Laptev Sea: spatial distributions of light attenuation and chlorophyll fluorescence. // *Reports on Polar Research*. 1995. Vol. 196. P. 178–186.



*Eicken H., Kolatschek J., Freitag J., Lindemann J., Kassens H., Dmitrenko I.* A key source area and constrains on entrainment for basin-scale sediment transport by Arctic sea ice // *Geophys. Res. Letters*. 2000. Vol. 27 (13). P. 1919–1922.

*Reimnitz E., Kassens H., Eicken H.* Sediment transport by Laptev Sea ice // Report of Polar Research. Russian-Germany Cooperation: «Laptev Sea System». 1995. № 176. P. 71–77.

*Wegner C., Holemann J.A., Dmitrenko I., Kirillov S., Kassens H.* Seasonal variations in Arctic sediment dynamics – evidence from 1-year records in the Laptev Sea (Siberian Arctic) // *Global and Planetary Change*. 2005. Vol. 48. P. 126–140. doi:10.1016/j.gloplacha.2004.12.009.

*R.E.VLASENKOV, A.P.MAKSHTAS*

### **HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS OF THE KARA AND LAPTEV SEAS**

*Based on the data of experimental investigations executed in ice-free parts of the Russian Arctic shelf Seas from the board of research vessels “Ivan Petrov” and “Ivan Kireev” in 2003–2008, and historical data, the spatial distributions of suspended matter in sea upper layer and its long-term variations are presented.*

*Keywords:* Shelf Seas of the Russian Arctic, suspended matter, transparency.