

Б.В. Иванов, А.К. Павлов

**КОСВЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ В ВОДАХ ФИНСКОГО ЗАЛИВА
(на примере бухты Портовая, Выборгский залив)**

B.V. Ivanov, A.K. Pavlov

**AN INDIRECT METHOD OF DEFINITION OF SUSPENDED
PARTICLES CONCENTRATION
IN THE WATERS of the GULF of FINLAND
(a case study of Portovaya Bay, Vyborg Gulf)**

Проанализированы результаты исследований прозрачности, мутности и концентрации взвеси в районе проектируемой трассы Северо-Европейского газопровода на участке бухта Портовая – остров Гогланд (октябрь 2005 г.). Предложен косвенный метод оценки фоновое состояние вод. Полученные результаты могут быть использованы для сравнения наблюдаемого уровня загрязнений отдельных акваторий Финского залива, подвергающихся интенсивному промышленному и рекреационному форсингу, по сравнению с естественным фоном.

Results of the studies of turbidity, transparency and suspended particles concentration in the area of the North-European gas pipeline projected in the sector between Portovaya Bay – Gogland Island (October 2005) are analyzed. An indirect method of estimation of background waters condition is proposed. The received results can be used to compare the observed contamination level of individual areas the Gulf of Finland exposed to intensive industrial and recreational forcing, and the natural background.

При санитарном анализе воды в естественных и искусственных водоемах и водотоках особое внимание уделяется, так называемым, органолептическим показателям [Новиков и др., 1981]. Под ними понимаются те, которые определяют внешний вид воды и воспринимаются органами чувств (зрение, обоняние и т.п.). Соответственно, к органолептическим наблюдениям относятся методы определения состояния водного объекта путем его непосредственного осмотра. Описание и определение органолептических свойств имеет большое значение для санитарной характеристики воды. Например, мутная вода неприятна по внешнему виду и подозрительна в бактериальном отношении. Гуминовые вещества, обуславливающие цветность воды, могут неблагоприятно влиять на минеральный обмен в организме и т.п. При органолептических наблюдениях

особое внимание обращают на явления, необычные для данного водоема или водотока и часто свидетельствуют о его загрязнении. В частности, появление повышенной мутности, посторонних окрасок, цветения воды, наличие нефтяных пленок. Так в соответствии с гигиеническими требованиями к качеству питьевой воды (ГОСТ 2874-73), мутность не должна превышать 1,5 мг/л по стандартной шкале (по каолину) [Гусева, 2000].

Мутность природных вод вызвана присутствием тонкодисперсных примесей, обусловленных нерастворимыми или коллоидными неорганическими и органическими веществами различного происхождения. Мутность воды определяют турбидиметрически (по ослаблению проходящего через пробу света) путем сравнения проб исследуемой воды со стандартными суспензиями. Результаты измерений выражают в мг/л (при использовании основной стандартной суспензии каолина) или ЕМ/л (единицы мутности на литр при использовании основной стандартной суспензии формазина). Турбидиметрическое определение предназначено для вод, имеющих переменчивый состав и форму тонкодисперсных примесей.

Взвешенные твердые вещества, присутствующие в природных водах и определяющие собственно их мутность, состоят из твердых частиц глина, песка или ила, суспендированных органических и неорганических веществ, планктона, различных микроорганизмов, а также детрита – остатков разложившихся клеток фитопланктона и зоопланктона. Концентрация взвешенных частиц связана с сезонными факторами и режимом стока, зависит от пород, слагающих дно водоема или русло водотока, естественных процессов разрушения берегов, а также антропогенных факторов, таких как дноуглубительные работы, строительство береговых сооружений и т.п. Взвешенные частицы влияют на прозрачность воды и на проникновение в нее света, на температуру, состав растворенных компонентов поверхностных вод, адсорбцию токсичных веществ, а также на состав и распределение отложений и на скорость осадкообразования. Вода, в которой много взвешенных частиц, не подходит для рекреационного использования по эстетическим соображениям. В соответствии с требованиями к составу и свойствам воды водных объектов у пунктов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения содержание взвешенных веществ в результате антропогенного форсинга не должна увеличиваться соответственно более, чем на 0,25 и 0,75 мг/л [Гусева и др., 2000]. Определение количества (концентрации) взвешенных частиц осуществляется при оценке состояния природных водоемов, при контроле процессов биологической и физико-химической обработки сточных вод, контроле последствий антропогенного воздействия (строительные работы и т.п.).

Мутность воды, а также ее цвет, определяющиеся, в совокупности, содержанием в ней различных окрашенных и взвешенных органических и минеральных веществ, обуславливают такую важную характеристику природных вод как прозрачность (или светопропускание). Ослабление интенсивности света с глу-

биной в мутной воде приводит к большему поглощению солнечной энергии (коротковолновой солнечной радиации) вблизи поверхности. Появление более теплой воды у поверхности уменьшает перенос кислорода из воздуха в подповерхностные и более глубокие слои воды, понижает плотность воды и, как следствие, повышает ее устойчивость (стабилизирует стратификацию). Уменьшение потока света также снижает эффективность фотосинтеза и биологическую продуктивность водоема. Определение прозрачности воды – обязательный компонент программ наблюдений за состоянием водных объектов, в частности программ стандартных океанографических наблюдений организаций Росгидромета.

Прозрачностью воды называют отношение потока излучения, прошедшего в ней без изменения направления путь, равный единице, к потоку, вошедшему в воду в виде параллельного пучка [Егоров, 1974]. Прозрачность тесно связана с коэффициентом пропускания воды (T), под которым понимается отношение потока излучения, пропущенного некоторым слоем воды, к потоку излучения, упавшему на этот на этот слой [Ерлов, 1970]:

$$T = e^{-cz}, \quad (1)$$

где c – показатель вертикального ослабления, z – глубина.

Тогда прозрачность воды может быть выражена как:

$$P = e^c, \quad (2)$$

т.е. прозрачность равна коэффициенту пропускания для однородного слоя единичной толщины.

Наряду с указанными физическим определением прозрачности используется и другое, в котором под прозрачностью воды понимается глубина, на которой перестает быть видимым белый диск диаметром 30 см (стандартный диск или диск Секи). Эту величину принято называть относительной прозрачностью. Глубина исчезновения белого диска – относительная прозрачность, связана с физическим понятием прозрачности, т.к. обе характеристики зависят от коэффициента ослабления [Шулейкин, 1968].

В данной работе мы попытались отыскать количественную взаимосвязь между относительной прозрачностью, мутности морской воды и концентрацией взвешенных частиц в морской воде на примере восточной части Финского залива. Конечная цель исследований – разработка простой и легко реализуемой методики оценки количества взвешенного материала по данным стандартных океанографических наблюдений. Выявление, в случае успеха, обеспеченных статистических связей между радиационными (оптическими) характеристиками морской воды и концентрацией взвешенных частиц позволит проанализировать доступную «историческую» океанографическую информацию, полученную на всей акватории Финского залива в новом качестве. Прежде всего, мы имеем в виду данные наблюдений о глубине исчезновения стандартного белого диска

(диск Секки). Эти измерения дают информацию об относительной прозрачности водной толщи, которая, в свою очередь, напрямую (количественно) связана с характером поглощения и рассеяния солнечной радиации в водной среде, т.е. с теми физическими параметрами, которые можно получить, выполняя специальные оптические измерения в водной толще. Как правило, стандартные океанографические наблюдения сопровождаются измерениями глубины исчезновения диска Секки, цвета морской воды и стандартными судовыми метеорологическими наблюдениями. Среди последних, наибольший интерес представляют: характеристики облачности, высота солнца, атмосферные явления, метеорологическая дальность видимости, параметры волнения и скорость ветра. Таким образом, комплексный анализ этих данных позволит получить информацию о пространственно-временной изменчивости относительной прозрачности морской воды при различных условиях освещенности и состояния поверхности моря.

Структура вод Финского залива формируется под влиянием водных масс Балтийского моря, речного стока, разрушения берегов и антропогенных воздействий. Последние два фактора, а также речной сток, являются основными источниками поступления взвешенных частиц (седиментов) воды залива. Более легкие, по сравнению с морскими, речные воды распространяются по поверхности, при этом происходит естественное перераспределение взвешенных частиц по глубине обусловленное, в первую очередь, размерами и весом частиц (Лисицын, 1994). Под воздействием антропогенного форсинга (промышленное воздействие, рекреационное обустройство побережья) формируются зоны и очаги искусственной взмученности. В то же время распреснение поверхностных слоев воды и радиационный прогрев способствуют формированию устойчивого пикноклина и ограничивают влияние ветрового перемешивания на процесс естественного перераспределения осадков по глубине. Определяющая роль, в этом случае, принадлежит бароклинной циркуляции, приливным явлениям, турбулентной диффузии и некоторым другим факторам. Замутненность водной толщи, помимо непосредственного воздействия на экологическую обстановку акватории (ограничение в перераспределении по глубине солнечной радиации, ослабление процессов фотосинтеза и т. д.), имеет и определенные климатические последствия. Как следует из ряда отечественных и зарубежных исследований (Аппель, Гудкович, 1979; Иванов, 2003; Lindemann et., 1995; Reimnitz et., 1995), взвешенные частицы, захваченных морским льдом в период его формирования, влияет на интенсивность таяния льда в последующий весенне-летний сезон. В первом приближении, этот механизм представляет собой следующую цепочку причинно следственных связей: осенние шторма→увеличение взмученности воды→захват седиментов (взвешенных частиц) образующимся льдом→перемещение загрязненных слоев к поверхности льда по мере его роста→критическое уменьшение альбедо поверхности загрязненных участков в период таяния льда (после схода снега)→изменение (ускорение) сроков очищения моря ото льда. Нам представляется, что совместная оценка характери-

стик относительной прозрачности и концентрации седиментов, а также анализ состояния и изменчивости ледяного покрова позволит проследить этот механизм и оценить его количественно. Практический выход – параметризация процессов таяния в рамках широкого спектра моделей морского льда, оценка характера и степени загрязненности конкретных районов Финского залива, исторический анализ естественной и антропогенной динамики седиментов и возможных источников их поступления.

Измерения относительной прозрачности на акватории Финского залива, на регулярной основе, выполнялись рядом организаций Росгидромета (СЗУГМС, СПб отделение ГОИН, ГГИ), а также другими организациями и ведомствами в предшествующие годы (1950–1980 гг.). Таким образом, имеется принципиальная возможность, сформировав соответствующий архив данных, построить карты распределения относительной прозрачности для различных участков Финского залива. Поскольку в период, предшествующий началу интенсивного промышленного освоения прибрежных территорий (строительство дамбы, различных очистных сооружений, нефтяных терминалов, новых портов и рекреационного освоения побережья) на акватории залива отсутствовали значимые антропогенные источники взмученности, то распределения, представленные на таких картах, можно будет рассматривать как естественный фон прозрачности, обусловленный, исключительно, естественными природными процессами. Сравнивая текущее (современное) состояние конкретных водных объектов и акваторий с естественным фоном, можно количественно судить о произошедших изменениях и степени воздействия на водную среду (например, в единицах мутности или концентрации взвешенных частиц).

В качестве обоснования возможности применения подобного подхода для анализа состояния распресненных вод заливов и фиордов, можно сослаться на результаты, полученные нами в Арктических морях и пресноводных фиордах арх. Шпицберген (Иванов и др. 2005; Иванов и др., 2007), а также на данные экспедиции АНИИ для района Выборгского залива и прилегающих акваторий (октябрь 2005). На результатах этой экспедиции остановимся более подробно. Мы проанализировали результаты наблюдений, выполненных на 47 станциях океанографического разреза, проложенного от бухты Портовая до района вблизи острова Гогланд (см. рис. 1).

На каждой станции выполнялся отбор проб воды с поверхностного и придонного слоев, а также измерялась мутность воды с помощью зонда YSU6920. Параллельно, в светлое время суток, измерялась относительная прозрачность воды диском. Секи. Отобранные пробы воды анализировались в лабораторных условиях. Мутность, в единицах NTU (нефелометрические единицы мутности), определялась с помощью микропроцессорного турбидиметра (измерителя мутности) «HANNA», концентрация взвеси определялась путем фильтрования проб воды через стандартные фильтры с диаметром калиброванных отверстий в 0,45 мн. В результате статистической обработки результатов лабораторных анализов

нам удалось выявить устойчивую связь между концентрацией взвеси в мг/л и мутностью в единицах NTU (рис. 2):

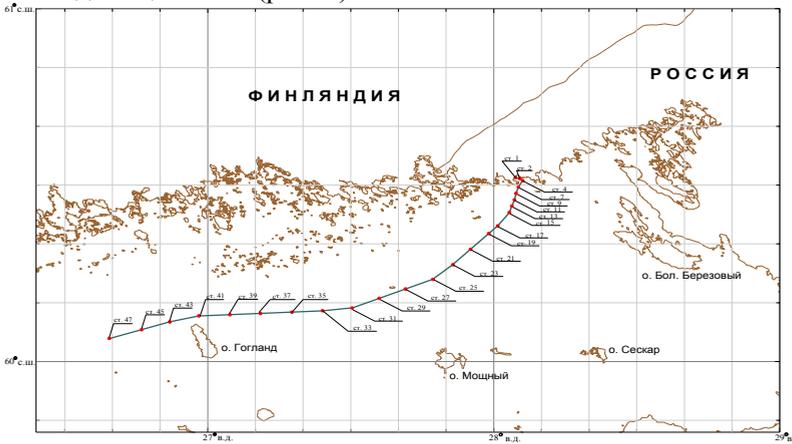


Рис. 1. Схема работ экспедиции на разрезе бухта Портовая – район о-ва Голланд в восточной части Финского залива (октябрь 2005 г.)

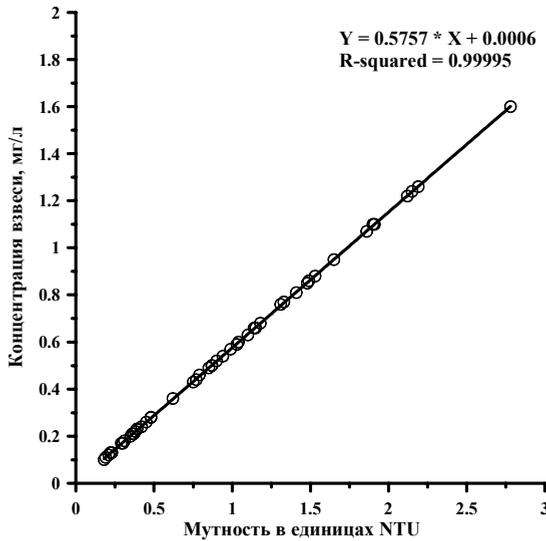


Рис. 2. Калибровочный график «мутность-концентрация», полученный по данным лабораторных определений

Соотношение, описывающее связь концентрации и мутности имеет вид:

$$\text{Концентрация [мг/л]} = K * \text{Мутность [NTU]} \quad (3)$$

$$K = 0,5765 \pm 0,0062$$

Полученную формулу можно рассматривать в качестве своеобразного «ключа», который позволяет, используя данные о вертикальном распределении

мутности в морской воде (измерения, выполненные зондом YSU6920), рассчитать концентрацию взвешенных частиц в водной толще. Однако не стоит забывать, что коэффициент пропорциональности между величинами мутности, выраженными в NTU и мг/л, очевидно должен зависеть от типа взвешенных частиц. Так, например, для илов 1 NTU соответствует концентрации взвеси в диапазоне 0,5–2 мг/л в зависимости от типа ила. В тоже время, имеется ряд работ, в которых показано, что для довольно разных, в географическом плане, акваторий (например, Белое море и фиорды Шпицбергена), тип взвешенных частиц может быть один и тот же [Лисицын и др., 2003, Шевченко, Иванов и др., 2005].

На рис. 3, а представлено распределение средневзвешенной по глубине мутности (NTU) от глубины места. Фактически, это распределение мутности от береговой зоны (бухта Портовая) до открытой, относительно, глубокой части залива (район острова Гогланд). Использование осредненных по глубине, а не измеренных на промежуточных горизонтах, значений NTU, обусловлено сложными погодными условиями, периодически возникающими во время измерений (сильный ветер, волнение). Измерения мутности датчиком зонда YSU6920 требует выдержки прибора на горизонте в течение определенного времени. Однако, при высоте волн достигающей, временами, 1,5 м, вертикальные колебания прибора составляли около 3 м и более. Таким образом, результаты, полученные для «конкретного» горизонта, едва ли можно считать репрезентативными. В целом, распределение представленное на этом рисунке демонстрирует закономерное уменьшение средней мутности от береговой зоны к глубоководной части залива.

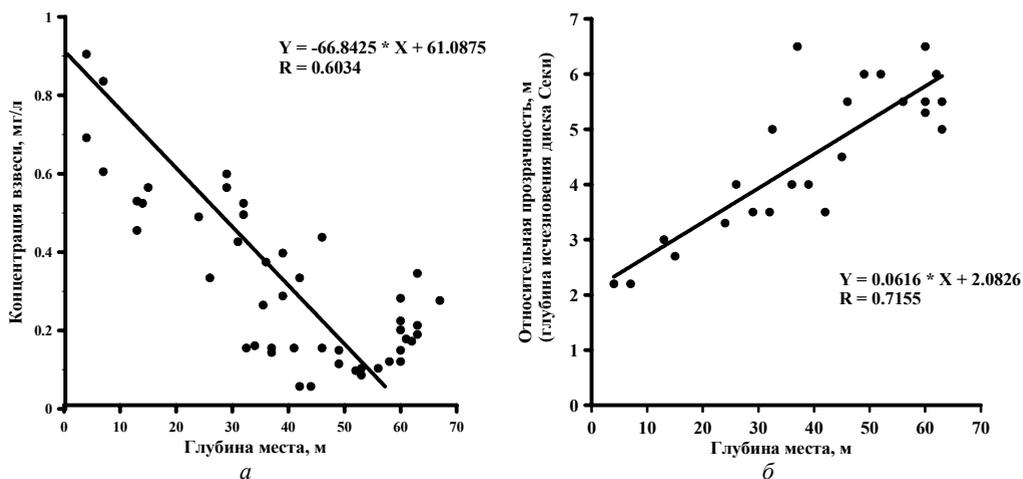


Рис. 3. Зависимость мутности (а) и относительной прозрачности (б) от глубины места.

Как было указано выше, на станциях разреза выполнялись измерения относительной прозрачности. С учетом особенностей волнения и неопределенностей, вносимых, изменчивостью погодных условий (облачность, видимость, ат-

мосферные явления и т.п.), мы получили подобную тенденцию и для изменения относительной прозрачности на разрезе (рис. 3, б).

Заключительным шагом анализа, стала попытка проанализировать зависимость между величинами относительной прозрачности и концентрации взвешенных частиц [формула (3)], полученными для станций разреза. Полученная зависимость, представленная на рис. 4, демонстрирует, с учетом погрешностей визуального определения относительной прозрачности и локального характера формулы (3), тесную связь между исследуемыми характеристиками.

Не вызывает сомнения, что при производстве работ, связанных, например, с прокладкой трубопроводов на дне залива, углублением дна в районе проектируемых фарватеров, намывании ис-

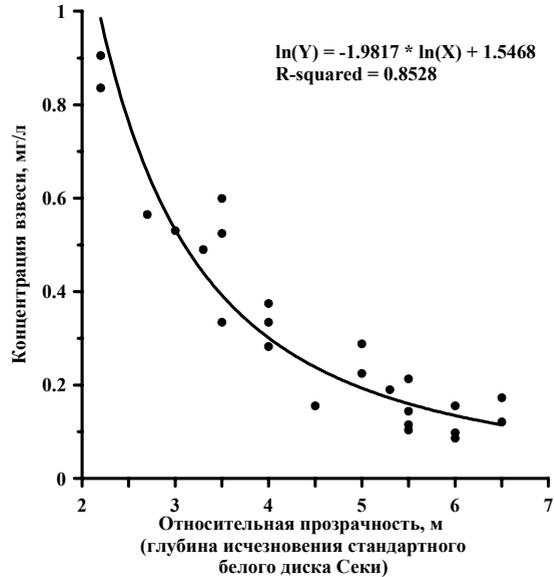


Рис. 4. Зависимость концентрации взвешенных частиц от относительной прозрачности

кусственных территорий (островов, причалов и т.п.), добыче песка и т.д., будут формироваться устойчивые во времени и пространстве зоны взмученности. Границы таких зон легко определяются как визуально, так и с помощью дистанционных методов. При этом, инструментальные оптические измерения, выполняемые с борта самолета или спутника (например, радиометр MODIS, установленный на спутниках “TERA” и “AQUA”), позволяют определять концентрацию взвеси в таких зонах. В тоже время, благодаря зависимости, приведенной на рис. 4, мы можем оценить, в первом приближении, фоновые или естественные значения концентрации взвеси в том или ином районе залива, где в настоящий момент проводятся определенные работы или изыскания.

Поскольку выявленные зависимости (рис. 3, 4) получены для осредненных по глубине величин мутности, необходимым этапом будущих экспериментальных исследований является выявление закономерностей вертикального перераспределения взвешенных частиц в водах залива под влиянием естественных и антропогенных факторов. Очевидно, что характер распределения будет отличаться для разных участков акватории залива. Это обусловлено, в первую очередь, типов донных отложений, сезонными и региональными особенностями речного стока, составом вносимых седиментов, локальной циркуляцией вод и т.д.

В заключении выскажем предположение о перспективности применения выше изложенного метода для оценки долговременных изменений суммарной концентрации взвешенных в морской воде частиц. Имеющиеся «исторические» данные мониторинга состояния вод Финского залива позволяют провести подобный прикладной анализ. В конечном счете, используя выявленные и уточненные статистические зависимости, можно оценить концентрацию взвешенных частиц (мутности) в различных частях залива в периоды предшествующие активному промышленному и рекреационному форсингу и оценить, с учетом современных контактных и дистанционных методов, произошедшие изменения и тенденции.

Авторы выражают глубокую признательность Рабочей группе «Морские берега» Научного Совета РАН по проблемам Мирового океана и Российскому государственному гидрометеорологическому университету за возможность принять участие в работе семинара «Берега восточной части Финского залива: современное состояние и устойчивое развитие», что способствовало написанию данной статьи.

Литература

1. *Апель И.Л., Гудкович З.М.* Отражательная способность ледяного покрова в период таяния льда в юго-восточной части моря Лаптевых // Сб. трудов «ПОЛЭКС-СЕВЕР-76». – Л.: Гидрометеониздат, 1979, с. 27–32.
2. *Гусева Т.В.* Гидрохимические показатели состояния окружающей среды. Справочные материалы. – М.: Эколайн, 2000. – 374 с.
3. *Егоров Н.И.* Физическая океанография. – Л.: Гидрометеониздат, 1974. – 455 с.
4. *Ерлов Н.* Оптическая океанография / Пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – 224 с.
5. *Иванов Б.В., Ионов В.В., J.-B. Orbaek.* Косвенный метод определения концентрации взвешенных частиц в водах фиордов Западного Шпицбергена. Сборник материалов V международной конференции «Комплексные исследования природы Шпицбергена». КНЦ РАН, г. Апатиты. 2005, вып. 5, с. 297–301.
6. *Иванов Б.В., Павлов А.К., J.-B. Orbaek.* Исследования взвешенных частиц в заливе Конгсфюрд, архипелага Шпицберген. // Сб. мат-лов VII междунар. конф. «Комплексные исследования природы Шпицбергена». КНЦ РАН, г. Апатиты. 2007, вып. 7, с. 156–164.
7. *Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в Мировом океане. – М.: Наука, 1994. – 448 с.
8. *Лисицын А.П., Шевченко В.П., Бкренок В.И., Копелевич О.В., Васильев Л.Ю.* Взвесь и гидрооптика Белого моря – новые закономерности количественного распределения и гранулометрии. / В кн.: «Актуальные проблемы океанологии» / Под ред. акад. Н.П. Лаврова. – М.: Наука, 2003, с. 556–607.
9. *Новиков Ю.В., Ласточкина Н.О., Болдина З.М.* Методы определения вредных веществ в воде водоемов. – М.: Медицина, 1981. – 376 с.
10. *Шулейкин В.В.* Физика моря. – М.: Наука, 1968. – 1083 с.
11. *Lindemann F., Holemman J.A., Korablev A., Zachek A.* Particle entrainment into newly forming sea ice-freeze-up studies in October 1995. In book: «Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: dynamics and history». (Section A: Modern Ocean and Sea-Ice Processes). Ed.: Kassens H. et. Springer-Verlag. Berlin.1999. pp. 113–125.
12. *Reimnitz E., Kassens H., Eicken H.* Sediment transport by Laptev Sea ice. Report of Polar Research. Russian-Germany cooperation: “Laptev Sea System”. Edited by J. Tiede et. 1995, №176, pp. 71–77.

Ключевые слова: концентрация, взвешанные частицы, вода, Финский залив.