

Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря.  
Материалы IX международной конференции  
11-14 октября 2004 г., Петрозаводск, Карелия, Россия  
Петрозаводск, 2005. С. 120-124.

## ПРИЛИВНОЙ ПЕРЕНОС ПРИМЕСИ В УСТЬЕ РЕКИ КЕМЬ

Р.Э. ЗДОРОВЕННОВ, Г.Э. ЗДОРОВЕННОВА

*Институт водных проблем Севера, Карельский научный центр РАН, Петрозаводск*

Приводятся результаты натурных гидрофизических исследований и гидродинамического моделирования приливных течений, хода уровня и приливного переноса примеси в мелководном устье р. Кемь (Онежский залив Белого моря). Показано, что в устьевой области р. Кемь определяющее влияние на перенос примеси оказывают сильные приливо-отливные течения, величина расхода реки играет незначительную роль. В связи с тем, что в акватории остаточная приливная циркуляция слаба, со временем происходит накопление примеси в непосредственной близости от источника.

**P.E. Zdorovennov & G.E. Zdorovennov. Tidal transport of pollutants in estuary of Kemi River** // The study, sustainable use and conservation of natural resources of the White Sea. Proceedings of the IXth International Conference, October, 11-14, 2004. Petrozavodsk, Karelia, Russia. Petrozavodsk, 2005. P. 120-124.

The importance of tidal mixing and transfer is discussed in relation to the distribution of substance in a shallow Kemi estuary (the White Sea). Results of hydrophysical investigations in Kemi estuary are presented. Calculation of tidal currents, sea-level fluctuations and distribution of substance are realized using simulation program CARDINAL. It is shown that the residual tidal circulation in Kemi estuary is rather weak.

В связи с возрастающим антропогенным воздействием на экосистемы прибрежных акваторий Белого моря в последние годы обострилась необходимость разработки методов оценки состояния, охраны и рационального использования их ресурсов. Наряду с натурными исследованиями акваторий, перспективным путем решения широкого круга задач в настоящее время стало математическое моделирование. Приливные процессы в существенной степени определяют динамику вод, распространение вещества, функционирование прибрежных экосистем Белого моря. В связи с этим изучение влияния приливной динамики на перенос и диффузию примеси в прибрежной зоне Белого моря является актуальной задачей научных исследований.

Для оценки характера и интенсивности взаимодействия речных и морских вод в зоне со значительной приливной динамикой в летние месяцы 2001 г. в Онежском заливе Белого моря Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН проводились гидрофизические исследования. Пространственные съемки температуры и электропроводности выполнялись STD-зондами, а длительные измерения на автономных буйковых станциях температуры, уровня моря, скорости и направления течений – регистраторами фирмы Aanderaa (TR-1, WLR-5, RCM-4). Основные характеристики используемых приборов с указанием измеряемых параметров, диапазона измерений, точности и разрешающей способности приведены в (Dolotov et al., 2002).

Анализ данных натурных измерений показал, что в Онежском заливе Белого моря происходит интенсивное приливное перемешивание в мелко-

водной прибрежной зоне. В летний период наблюдается неоднородное распределение температуры и солености по глубине, связанное в первую очередь с прогревом верхнего слоя. На небольших глубинах (примерно до 10-15 м) вся водная толща стратифицирована слабо. Хорошо выраженная стратификация наблюдается лишь в районах с глубинами более 15 м. Речные воды и взвесь поступают в верхний слой и на небольших глубинах в фазу прилива перемешиваются с нижними морскими водами, а в более глубоких районах перемешивание происходит только в верхнем слое. В районах с глубинами более 15 м в нижнем слое располагаются холодные морские воды с повышенными значениями солености.

В Онежском заливе Белого моря доминирует полусуточная волна  $M_2$  (Гидрометеорология..., 1991). На входе в Онежский залив приливные течения имеют реверсивный характер. Минимальные амплитуды колебаний уровня отмечаются на открытых акваториях, максимальные – в районах устьев рек и на мелководьях. Практически везде наблюдается неравенство приливных и отливных фаз. В устьях рек отмечено уменьшение скоростей приливных течений, что можно объяснить трансформацией приливной волны на мелководье и ее взаимодействием с речным потоком. В устье р. Кемь наблюдались приливные колебания уровня и течений с периодом полусуточной волны. Скорости приливных течений на приливе и отливе были незначительны (не более  $0.1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ), на полной и малой воде возрастали до  $0.6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Было проведено моделирование приливных колебаний уровня, течений и переноса примеси в устье

р. Кемь (Рис. 1) путем численных экспериментов с помощью программы CARDINAL, реализующей систему уравнений мелкой воды, уравнение горизонтального переноса и турбулентной диффузии в криволинейных координатах и предназначенной для исследования динамики прибрежных вод (Клеванный, 1999).

В двумерной постановке уравнения для полных потоков и уравнение горизонтального переноса и турбулентной диффузии имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_t + \left(\frac{U^2}{H}\right)_x + \left(\frac{UV}{H}\right)_y &= -gH\zeta_x + fV + K\Delta U - f_b \frac{U|\vec{V}|}{H^2} \\
 V_t + \left(\frac{UV}{H}\right)_x + \left(\frac{V^2}{H}\right)_y &= -gH\zeta_y - fU + K\Delta V - f_b \frac{V|\vec{V}|}{H^2} \\
 \zeta_t + U_x + V_y &= 0 \\
 (\bar{c}H)_t + (U\bar{c})_x + (V\bar{c})_y &= AH\Delta\bar{c} - \lambda\bar{c}H
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $U$  и  $V$  – полные потоки;  $H$  – полная глубина потока;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\zeta$  – уровень свободной поверхности;  $f$  – параметр Кориолиса;  $K$  – коэффициент горизонтального турбулентного обмена;  $f_b$  – коэффициент придонного трения;  $\bar{c}$  – осредненная по глубине концентрация;  $A$  – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии примеси;  $\lambda$  – коэффициент неконсервативности примеси.

Коэффициент горизонтального турбулентного обмена  $K$  рассчитывался при помощи эмпирической формулы, и его значение зависело от шага сетки и суммы градиентов составляющих скорости. Для коэффициента придонного трения  $f_b$  была принята безразмерная величина 0.014. Коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии примеси  $A$  рассчитывался по эмпирической формуле, связываю-

щей этот коэффициент с масштабом процесса  $L$  (локальный шаг сетки):

$$A = 10^{-6} e^{(1.15 \ln(100L))}
 \tag{2}$$

Значение коэффициента неконсервативности  $\lambda$  принималось равным нулю.

Система уравнений (1) решается при следующих граничных и начальных условиях. На твердых границах расчетной области принималось условие непротекания. На открытых границах задавались колебания уровня с периодом полусуточной волны  $M_2$  и амплитудой 0.65 м и среднегодовой расход реки. Поступление примеси задавалось в виде точечного источника постоянной интенсивности мощностью 100 ед.·м<sup>-3</sup>.

Для учета сложного очертания береговой линии приустьевой области р. Кемь, расположенных в ней островов и особенностей рельефа дна была построена криволинейная координатная сетка с пространственным шагом 100-250 м (Рис. 1).

Анализ результатов моделирования показал, что на приливе и отливе скорости течений в приустьевой области р. Кемь незначительны, на большей части акватории они составляют 0.05-0.15 м·с<sup>-1</sup>, в узостях между островами и в устье р. Кемь увеличиваются до 0.35 м·с<sup>-1</sup> (Рис. 2). В моменты полных и малых вод скорости течений возрастают до 0.50-0.75 м·с<sup>-1</sup>, в узостях их значения превышают 1.00 м·с<sup>-1</sup>. Стоковое течение из устья р. Кемь наиболее хорошо развито на малой воде, скорости его достигают значений 0.75 м·с<sup>-1</sup>. В пункте, расположенном в устье р. Кемь, время роста уровня на 5-10 минут меньше времени падения. Неравенство полных и малых вод проявляется слабо. Остаточная приливная циркуляция в акватории мала. Результаты моделирования

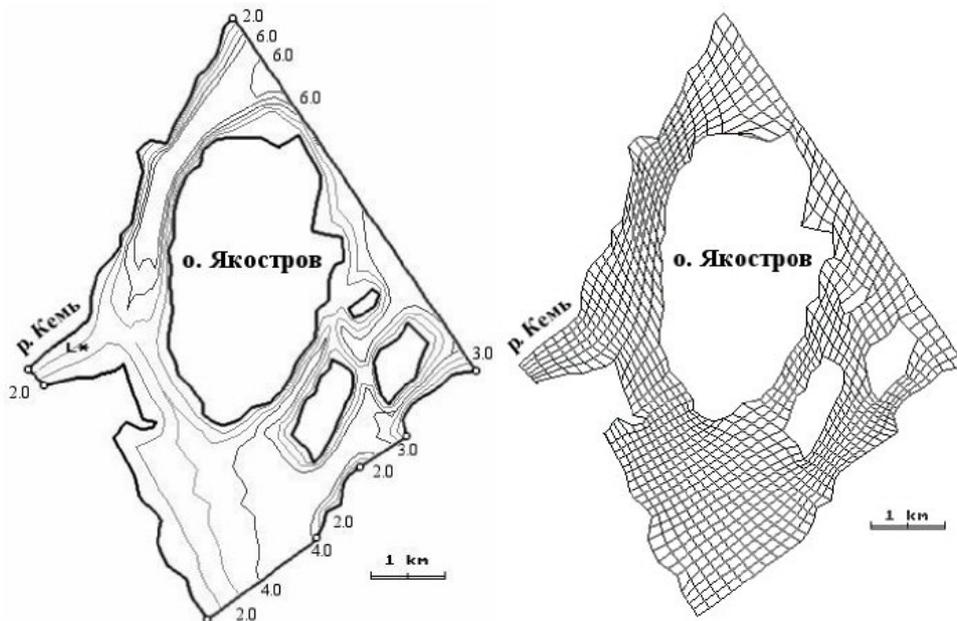


Рис. 1. Батиметрия приустьевой области р. Кемь, местоположение мареографа колебаний уровня моря (L\*) и сеточная область, используемая при моделировании

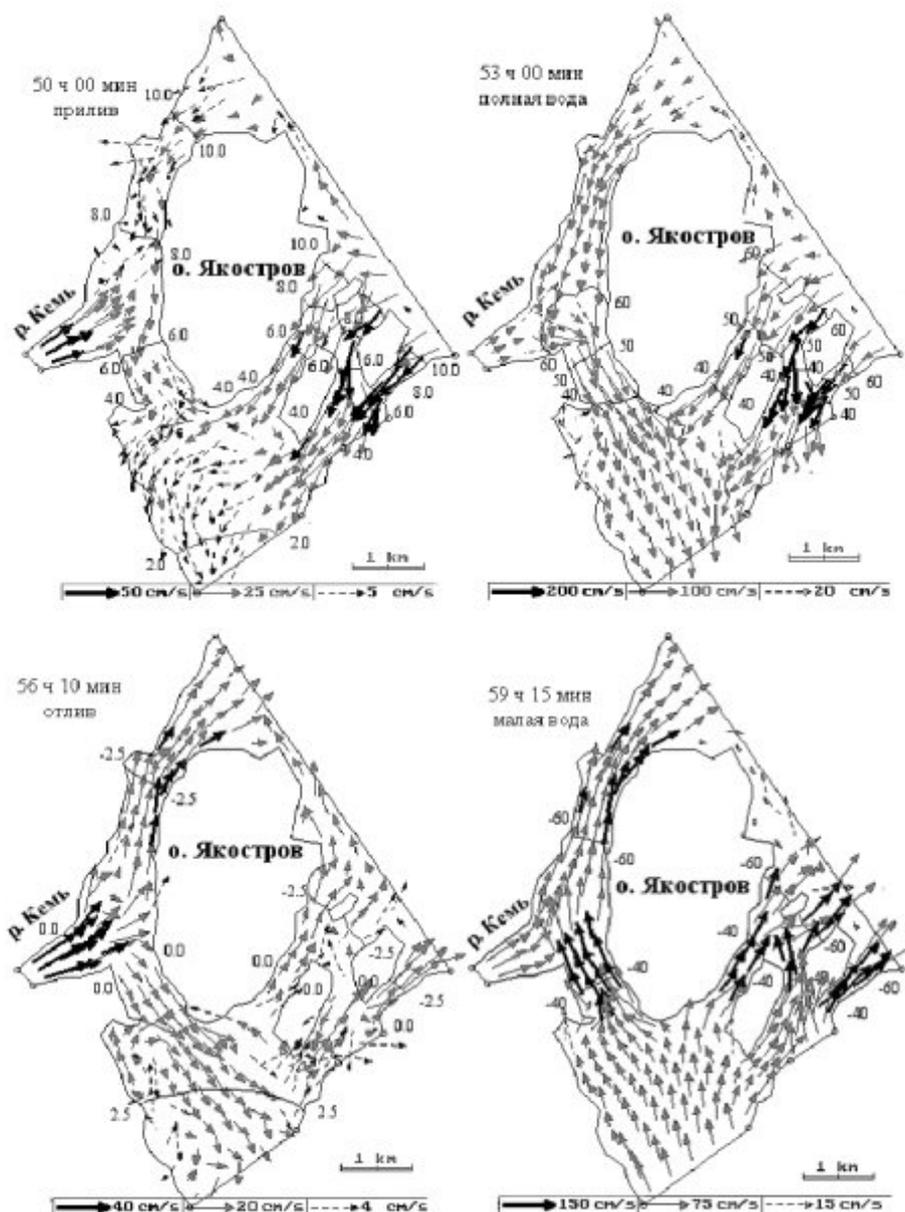


Рис. 2. Скорости течений и положения уровня в течение приливного цикла в приустьевой области р. Кемь

приливных явлений в устье р. Кемь достаточно адекватно описывают особенности приливной динамики акватории, выявленные в ходе натурных исследований (Dolotov et al., 2002).

Для исследования распространения примеси в приустьевой области р. Кемь было проведено два эксперимента. В первом была получена картина переноса примеси при задании среднегодового расхода реки по расчетной области в течение одного приливного цикла. Во втором эксперименте исследовался перенос примеси за три приливных цикла при минимальном, среднегодовом и максимальном расходах реки. В устье р. Кемь устанавливался точечный источник примеси мощностью  $100 \text{ ед.} \cdot \text{м}^3$ . Получены следующие результаты.

В момент равновесного положения уровня на приливе (74 ч 40 мин) пятно примеси вытянуто вдоль материкового берега в виде узкой полосы (Рис. 3). Концентрация примеси максимальна в средней части этой полосы на расстоянии до двух км от источника. Затем картина существенно меняется. В конце прилива пятно примеси начинает смещаться вправо от устья реки. В момент полной воды (77 ч 40 мин) основной поток примеси направлен ниже о. Якостров. При этом максимальные концентрации примеси наблюдаются вдоль материкового берега.

В момент равновесного положения уровня на отливе (80 ч 40 мин) вся примесь переносится вправо и вниз от устья р. Кемь. В следующие три часа отлива поток примеси быстро возвращается на прежнее место. К моменту малой воды (83 ч 40 мин)

пятно примеси заполняет все пространство между материком и о. Якостров. Небольшие концентрации примеси наблюдаются с мористой стороны о. Якостров, которые в течение следующих двух часов счота уносятся отливным течением за пределы сеточной области. К началу прилива (85 ч 40 мин) пятно примеси вновь вытянуто вдоль материкового берега акватории в виде узкой полосы.

Во втором эксперименте перенос примеси исследовался при задании минимального ( $97 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ), среднегодового ( $260 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ) и максимального ( $500 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ) расходов р. Кемь. Для всех вариантов было рассчитано начальное положение пятна при-

меси – на 27 ч счота. На этот момент в акватории наблюдается полная вода, и пятно примеси целиком находится в пределах сеточной области. Были получены положения пятна примеси через один, два и три приливных цикла. Во всех трех вариантах временная изменчивость положения пятна примеси после 51 ч 50 мин (второй приливной цикл) мала. Это говорит о том, что остаточная приливная циркуляция в данной акватории очень незначительна. В случае минимального расхода реки пятно с максимальными концентрациями за три приливных цикла не успевает покинуть устьевой области (Рис. 4).

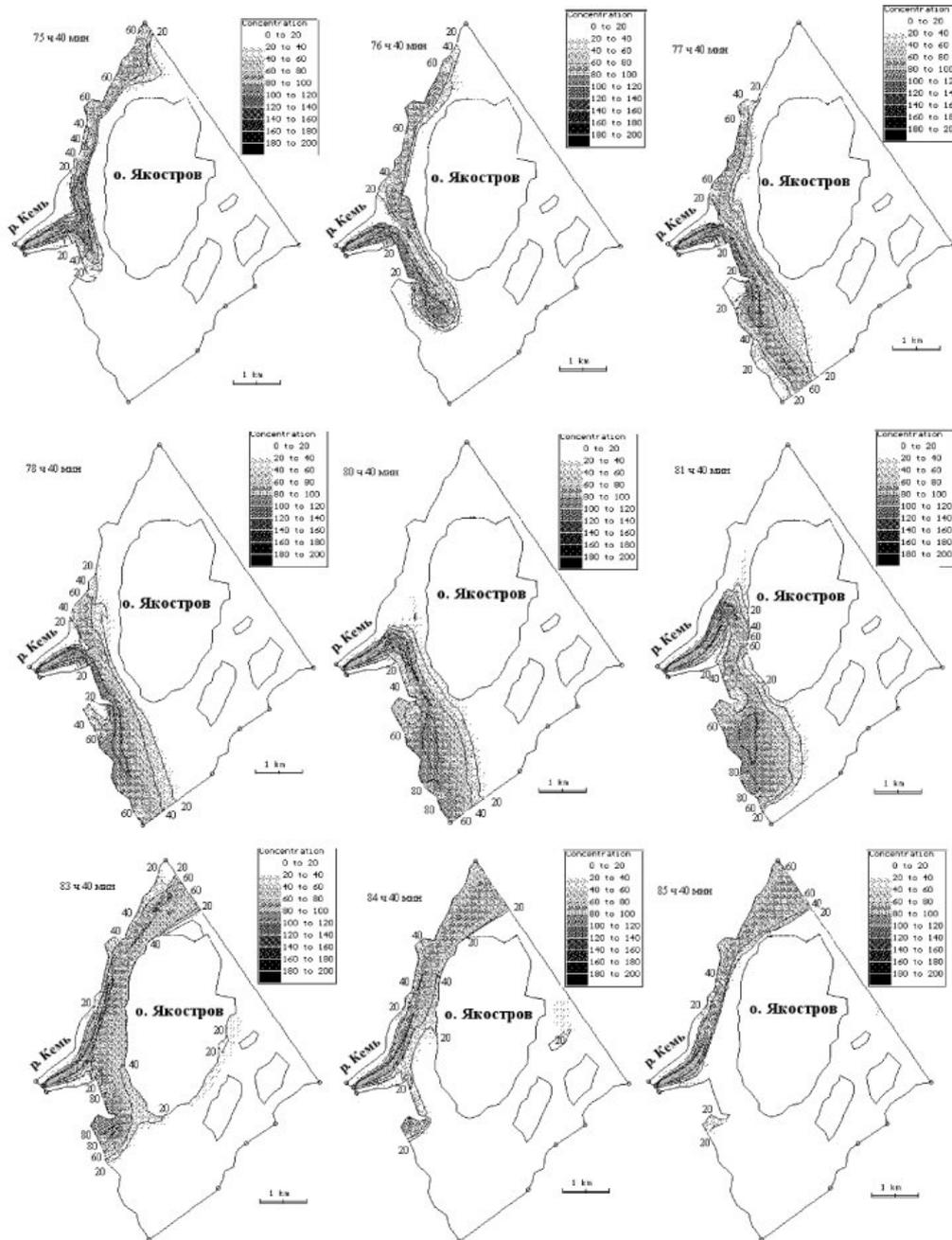


Рис. 3. Временная изменчивость пятна примеси в приустьевой области р. Кемь в течение приливо-отливного цикла при среднегодовом расходе реки

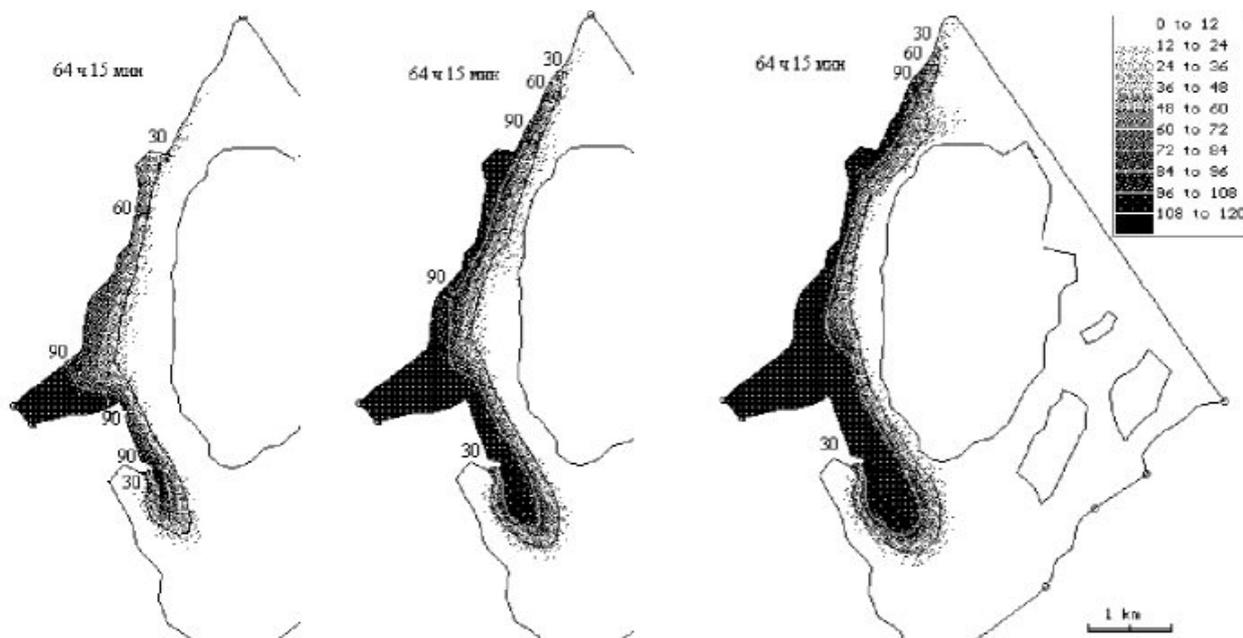


Рис. 4. Распространение пятна примеси в приустьевой области р. Кемь при задании минимального (слева), среднегодового (в центре) и максимального (справа) расходов реки

В случае среднегодового и максимального расходов граница пятна с максимальными концентрациями примеси за три приливных цикла удаляется от устья вверх на три и четыре км соответственно. Расстояние, на которое распространяется граница пятна с максимальными концентрациями примеси вправо от устья реки составляет 1.5 км для минимального расхода и 2.0 км для среднего и максимального. Ширина пятна с максимальными концентрациями в случае минимального, среднего и максимального расхода составляет 100, 250 и 500 м соответственно.

Таким образом, в устьевой области р. Кемь на определенной стадии прилива пятно примеси оказывается вытянутым вдоль берега в непосредственной близости от источника. Сильные приливо-отливные течения на разных стадиях прилива переносят пятно примеси по акватории, однако поскольку остаточная приливная циркуляция в данном районе незначительна, существенного итогового удаления пятна примеси от источника не происходит. Концентрация примеси в прибрежной зоне со временем увеличивается. Выявлено, что в устьевой об-

ласти р. Кемь определяющее влияние на перенос примеси оказывают сильные приливо-отливные течения, величина расхода реки играет второстепенную роль. В связи с тем, что в акватории остаточная приливная циркуляция слаба, со временем возможно накопление примеси в прибрежной зоне в непосредственной близости от источника.

#### Литература

- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологическое состояние. 1991. Л.: Гидрометеоиздат. 350 с.
- Клеванный К.А. 1999. Моделирование длинноволновых процессов в геофизической гидродинамике // Дисс. ... доктора физ.-мат. наук по специальности океанология. СПб. 314 с.
- Dolotov Y., Filatov N., Nemova N., Shevchenko V., Rimskii-Korsakov N., Denisenko N., Kutcheva I., Platonov A., Demina L., Zdorovenov R., Kovalenko V. 2002. Studies of the water and suspended matter dynamics, anthropogenic pollution, and ecosystem living conditions in the estuaries (from the example of the Karelian coast of the White sea) // *Oceanology*. Vol. 42 (1). P. S135-S147.