

*Д. К. Старицын, В. Р. Фукс*

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ\***

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

На основе статистического анализа временной изменчивости среднемесячных величин первичной продукции, рассчитанной с помощью спутниковых измерений хлорофилла, определены линейные тренды в различных частях Балтийского моря для различных масштабов изменчивости. Оценены среднеквадратические отклонения колебаний продукции в диапазоне межгодовых и сезонных временных масштабов. Установлена корреляционная зависимость между изменчивостью продукции и основными гидрометеорологическими процессами. Путем спектрального анализа оценена и картирована амплитуда межгодовых и сезонных колебаний продукции. Рассмотрена пространственная и временная структура сезонных колебаний первичной продукции. Показано, что годовые и полугодовые колебания почти одновременно достигают максимальных значений на всей акватории моря. На основе взаимного вейвлет-анализа получены оценки вейвлет-когерентности и разности фаз между флуктуациями первичной продукции и дивергенцией полного потока течений. Наиболее устойчивые оценки (когерентность 0.8–0.9) отмечаются на периодах сезонных колебаний. Фазовое запаздывание колебаний первичной продукции относительно дивергенции полных потоков в этом случае составляет 3–6 месяцев. Библиогр. 14 назв. Ил. 8. Табл. 3.

*Ключевые слова:* первичная продукция, тренды, спектральный анализ, взаимная корреляция, взаимный вейвлет-анализ, когерентность, разность фаз.

*D. K. Staritsyn, V. R. Fuks*

## **SPATIAL-TEMPORAL VARIABILITY OF THE PRIMARY PRODUCTION STATISTICS OVER THE BALTIC SEA BY MEANS OF SATELLITE INFORMATION**

St Petersburg State University,  
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Based on a statistical analysis of temporal variability of monthly primary production values calculated from satellite measurements of chlorophyll, the linear trends of the primary production in different parts of the Baltic Sea for different scales of variability are defined. Root-mean-square deviations of the production are assessed for the characteristic range of inter-annual and seasonal time scales. Correlation has been estimated between the variable production value and the main hydrometeorological processes that determine its variability in the Baltic Sea. Using the spectral analysis, we have estimated and mapped amplitudes of the inter-annual and seasonal fluctuations of production. The spatial and temporal structure of the seasonal primary production fluctuations in the Baltic Sea is dealt with. The annual fluctuations and the semi-annual fluctuations are shown to reach their peaks in the region over the sea at about the same time. Estimates of the coherence and phase difference between the primary production change and the full flow divergence of currents are obtained in terms of the cross wavelet analysis. The most stable estimates (with coherence 0.8–0.9) are found at the periods of seasonal fluctuations. The phase lag of the primary production change relative to the full flow divergence are then about 3–6 months. Refs 14. Figs 8. Tables 3.

*Keywords:* primary production, trends, spectral analysis, cross-correlation, cross-wavelet analysis, coherence, phase difference.

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ № 18.37.140.2014.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2017

## Введение

Балтийское море — почти полностью замкнутый внутриматериковый шельфовый бассейн, сообщающийся с Северным морем через узкие мелководные датские проливы с очень сложным рельефом дна. Эпизодические затоки через эти проливы трансформированных североморских вод, обладающих повышенной соленостью и высоким содержанием кислорода, распространяются течениями в южную и центральную части Балтики, оказывая воздействие на экосистему моря. Достигнув Гданьского залива, поток поворачивает на север и движется вдоль восточного берега до острова Хнума. Здесь поверхностное течение разветвляется на три потока. Один из них идет через Ирбенский пролив в Рижский залив, где образует циклонический круговорот. Другой поток входит в Финский залив и вдоль его южного берега распространяется до устья Невы, затем поворачивает на северо-запад и, двигаясь вдоль северного берега, вместе с речными водами выходит из залива. Третий поток идет на север и проникает в Ботнический залив. Затем вдоль финских берегов он направляется на север, огибает северное побережье залива и вдоль побережья Швеции следует на юг, замыкая общее циклоническое вращение.

Основной целью представляемого исследования является оценка крупномасштабных возмущений первичной продукции и их связь с динамикой вод Балтийского моря.

Представление об обилии первичной продукции (ПП) в водах Балтийского моря сложились, главным образом, на основе данных судовых определений. Обычно весеннее увеличение ПП начинается на юге моря в марте. Осенняя «вспышка» происходит в сентябре-октябре и продолжается до ноября. По интенсивности она существенно слабее весенней. По данным С. В. Александрова в 2001 г. первичная продукция фитопланктона в юго-восточной части Балтийского моря составила 347–540 гС/(м<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>). В соответствии с этими оценками минимальная величина продукции отмечается весной в районе Вислинского залива, где биомасса фитопланктона составляла 10–11 г/м<sup>3</sup>. В августе 2002 г. средняя величина биомассы фитопланктона увеличилась и оценивалась 13–26 г/м<sup>3</sup> [1].

Начиная с июня в Балтийском море наблюдается массовое развитие сине-зеленых водорослей (*Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*), переходящее в «цветение» воды. Биомасса фитопланктона возрастает до 63–76 г/м<sup>3</sup>. В Куршском заливе, например, в период «гиперцветения» в августе средняя для залива биомасса фитопланктона достигает 639 г/м<sup>3</sup>. Позднее, в ноябре, содержание биомассы фитопланктона здесь обычно не превышает 20 г/м<sup>3</sup>. Это подтверждают результаты других исследователей, обобщенные в работе О. И. Крыловой, Е. Н. Науменко [2].

В работе [3] оценена среднегодовая величина ПП за период 2003–2007 гг. для юго-восточной части Балтийского моря, которая составила 231 гС/м<sup>2</sup>год<sup>-1</sup>.

Судовые данные позволили определить общие представления об изменчивости ПП в Балтийском море, но оказались явно нерепрезентативными в отношении сезонных и межгодовых пространственно-временных масштабов изменчивости. В то же время именно эти масштабы изменчивости полей ПП наиболее существенны для решения таких важных прикладных задач, как обеспечение морского промысла и долгосрочные прогнозы биологической продуктивности Балтийского моря.

Крупномасштабные колебания первичной продукции планктона и формирование зон высокой продуктивности отражают динамические процессы, происхо-

дящие в Балтийском море, обусловленные циркуляцией вод, вертикальной конвекцией, радиационным прогревом, атмосферными процессами, освещенностью, влиянием речного стока. Хорошо известно [4, 5], что, с одной стороны, в морских циклонических образованиях благодаря подъему глубинных водных масс, богатых биогенами, создаются условия для генерации первичной продукции, а с другой — из-за дивергенции течений в циклонах происходит вынос продукции на периферию этих динамических систем. В антициклонах, благодаря конвергенции течений, происходит концентрация переносимых субстанций [6].

Действительно, на изображенной на рис. 1, а совмещенной пространственной картине распределения средних значений ПП и векторов геострофических течений в Балтийском море, прежде всего, обращают внимание выраженные области минимальных значений ПП в зонах циклонических завихрений течений (например, циклонический круговорот над Готландской впадиной) и образование биотических фронтов на периферии этих областей. С другой стороны, заметно увеличение продукции в центрах антициклонических образований. Например, в Ботническом заливе на  $61^\circ$  с. ш..

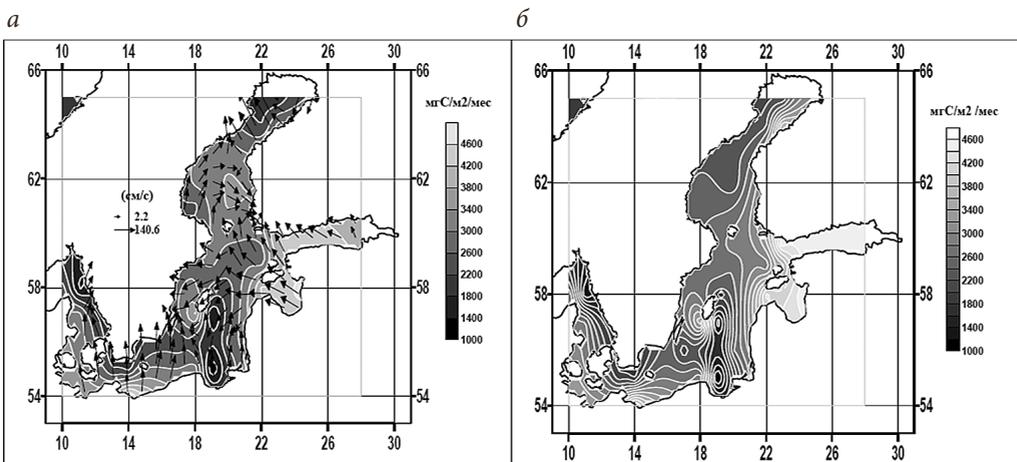


Рис. 1. Распределение оценки математического ожидания первичной продукции и векторов геострофических течений (а), среднеквадратического отклонения ПП (б) в Балтийском море по данным спутниковой информации (2003–2014 гг.)

## 1. Исходные материалы и методы

В качестве исходной информации нами использовались среднемесячные временные ряды первичной продукции, полученные по спутниковым данным за период 2003–2014 гг. в пунктах, представленных на рис. 2.

Для расчетов применялись следующие материалы:

1) среднемесячные временные ряды первичной продукции (2003–2014 гг.) по данным спутниковых измерений (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/>);

2) спутниковые альтиметрические данные об уровне Балтийского моря за период с 2003 по 2014 г. (GEOSAT, ERS-1/2, T/P, GFO, Jason, Envisat);

- 3) временные ряды составляющих скоростей течений (сайт AVISO за период 1993–2014 гг.);
- 4) среднегодовая температура поверхности воды Балтийского моря;
- 5) суммарный береговой сток рек в Балтийское море ( $\text{км}^3/\text{год}$ );
- 6) временные ряды дивергенции полного потока ( $\text{div}\vec{V}H$ ), рассчитанные для южной ( $54\text{--}56^\circ$  с. ш.), центральной ( $57\text{--}60^\circ$  с. ш.) и северной ( $61\text{--}64^\circ$  с. ш.) частей моря (на рисунке заштрихованы).

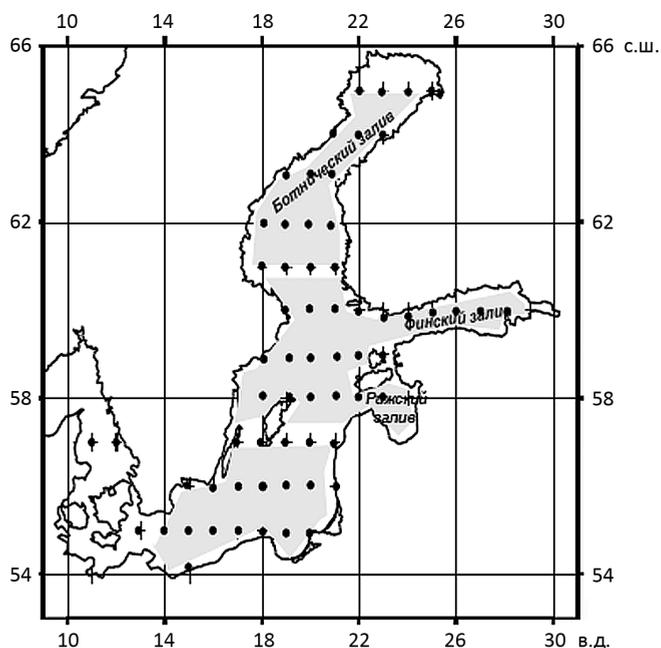


Рис. 2. Схема точек, в которых рассчитывалась первичная продукция

В настоящее время, благодаря развитию спутниковых методов исследования океана, появилась возможность оценивать ПП в широком диапазоне пространственно-временных масштабов по концентрации хлорофилла. Разработаны различные алгоритмы расчета первичной продукции [7, 9], в которых в качестве входных данных используют концентрацию хлорофилла ( $Chl-a$ ), температуру поверхности моря и фотосинтетическую радиацию на данной широте. Обычно статистическая связь между концентрацией  $Chl-a$  и биомассой фитопланктона оценивается как пропорциональная. Удельное содержание  $Chl-a$  зависит от уровня биомассы фитопланктона, с увеличением которой оно убывает [10]. Вместе с тем количество ассимилированного фитопланктоном органического вещества в процессе фотосинтеза (ПП) далеко не пропорционально средней концентрации хлорофилла. Имеется целый ряд критических замечаний подробную библиографию о которых можно найти в монографии [11], а также в работах [8, 9]. Однако все критики хлорофиллового метода определения продуктивности не отрицают его важности и не предлагают альтернативы. Очевидно, что ассимиляционное число в расчетном уравнении должно оцениваться для каждого района дифференцированно по времени года. Сравнивая оценки адекватности, полученные для различ-

ных алгоритмов восстановления первичной продукции по хлорофиллу, представленные в табл. 1, нетрудно убедиться, что модель из [7] имеет лучший результат нежели оценки других авторов как в пелагиальной ( $R^2 = 0.80$ ) так и в шельфовой ( $R^2 = 0.61$ ) зонах.

Таблица 1. Результаты сравнения различных алгоритмов восстановления первичной продукции по хлорофиллу [12]

Алгоритм	Коэффициент корреляции ( $R^2$ )	
	(в пелагиале)	(на шельфе)
Bhr 97 GSM/Bhr	0.80	0.61
Bhr 97 GSM/NASA	0.64	0.37
Bhr 97 OC3/NASA	0.52	-0.07
Bhr 05 GSM/Bhr	0.23	0.17
Bhr 05 GSM/NASA	0.17	0.12
Bhr 05 OC3/NASA	0.09	-0.15
Mara 03 GSM/Bhr	0.69	0.52
Mara 03 GSM/NASA	0.54	0.25
Mara 03 OC3/NASA	0.37	-0.11
Bhr 97 BOREALI / NASA	0.75	-
Mara 03 BOREALI / NASA	0.73	-

В нашей работе привлекались данные ПП, полученные с помощью вертикально обобщенной модели (VGPM) [7, 9]. В настоящее время эта модель является наиболее употребляемой при расчетах первичной продукции по спутниковым данным.

На рис. 1, а, представлено распределение оценки математического ожидания ПП в Балтийском море. Нетрудно заметить, что средние значения распределены неравномерно. Максимальные значения ( $3500\text{--}4000 \text{ мгС/м}^2\text{мес}^{-1}$ ) наблюдаются в Финском и Рижском заливах и на юге моря вдоль северного побережья Германии и Польши в полосе  $10\text{--}18^\circ$  в. д. Области минимальных значений математического ожидания первичной продукции ( $< 1000 \text{ мг С/м}^2\text{мес}^{-1}$ ) расположены к северу от Гданьского залива и в проливе Каттегат.

Рассматривая изменчивость продукции в терминах среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ) (рис. 1, б), которое можно сопоставить со средней амплитудой колебания ПП по акватории моря, нетрудно заметить, что наибольшая амплитуда (до  $4600 \text{ мгС/м}^2\text{мес}^{-1}$ ) колебания обилия первичной продукции приходится на Финский и Рижский заливы и зону вдоль южного побережья Балтийского моря. В проливе Каттегат, в наиболее активном в динамическом отношении районе, среднеквадратическое отклонение продукции гораздо ниже  $\sigma = 900\text{--}1200 \text{ мгС/м}^2\text{мес}^{-1}$ .

## 2. Межгодовая и сезонная изменчивость первичной продукции

Если обратиться к линейным трендам (рис. 3), вычисленным по среднемесячным значениям для южной, центральной и северной частей моря, то нетрудно обнаружить, что в период 2003–2013 гг. наблюдался устойчивый рост продукции на всей акватории Балтийского моря. Наиболее интенсивный рост отмечался в северном районе, в котором средняя величина роста составляла  $\sim 80 \text{ мгС/м}^2\text{мес}^{-1}$ .

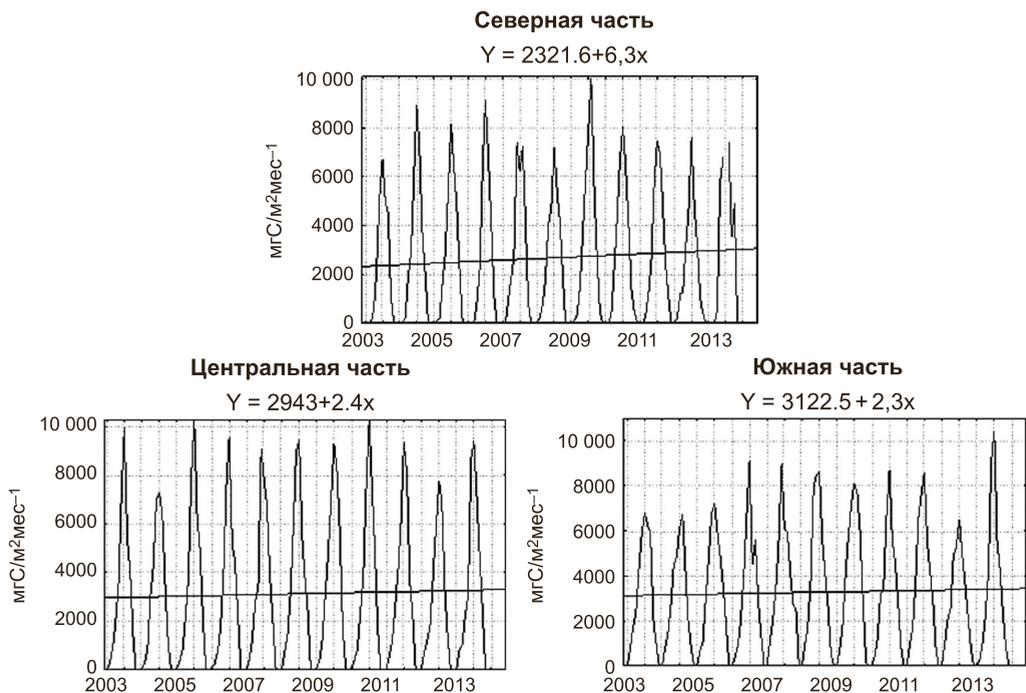


Рис. 3. Среднемесячный временной ход и линейные тренды первичной продукции в различных частях Балтийского моря

В табл. 2 представлены оценки линейных трендов первичной продукции для различных частей Балтийского моря, рассчитанные на основе выражения

$$P = bt + c,$$

где  $P$  — первичная продукция;  $c$  — начальное значение первичной продукции в момент времени, принятый за начало отсчета ( $\text{мгС}/\text{м}^2 \text{мес}^{-1}$ );  $b = \frac{\partial P}{\partial t}$  — коэффициент, характеризующий скорость линейного изменения продукции ( $\text{мгС}/\text{м}^2 \text{мес}^{-1}$ ).

Таблица 2. Оценки трендов для среднемесячных временных рядов первичной продукции Балтийского моря (2003–2013 гг.)

Параметры тренда	Южная часть	Центральная часть	Северная часть
$b$	2.3	2.4	6.3
$c$	3122	2943	2322

Сравнивая среднегодовой ход продукции с ходом гидрологических факторов, в той или иной степени определяющих ее изменчивость (рис. 4), можно заметить, что усиление сигнала первичной продукции в 2005 и 2008 гг. совпадает с максимальным суммарным стоком рек и дивергенцией полного потока. В то время как максимум среднегодового уровня Балтийского моря опережает наступление максимальных значений продукции на один год. Несмотря на то что продолжительность анализируемых рядов в статистическом отношении недостаточна для установления устойчивой связи, есть основание полагать, что эти факторы связаны. Так, речной

сток существенно влияет на изменение солености в прибрежных районах моря, а следовательно, и на биоту [13]. Известно, что атмосферная циркуляция влияет на водообмен с Северным морем, на речной сток и на атмосферные осадки [14].

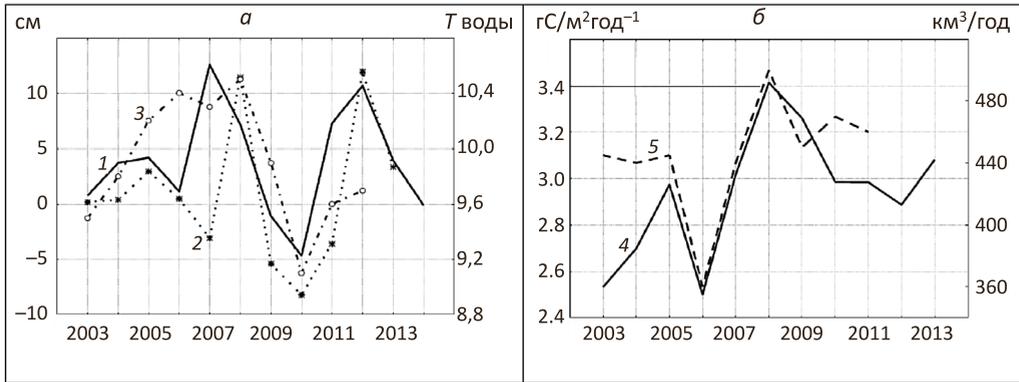


Рис. 4. Временной ход среднегодовых значений:

*a* — уровня Балтийского моря (см) (1);  $div\bar{V}H$  (см) (2); температуры воды (3); *б* — первичной продукции ( $гС/м^2год^{-1}$ ) (4); суммарного берегового стока рек в Балтийское море ( $км^3/год$ ) (5)

Для ориентировочной оценки взаимосвязи среднегодовых процессов с колебаниями первичной продукции моря был применен взаимный корреляционный анализ полученных данных. В табл. 3 представлены результаты анализа. Видно, что максимальные оценки коэффициента взаимной корреляции наблюдаются на отрицательных фазовых сдвигах.

Наиболее устойчивая — обратно пропорциональная связь колебаний ПП отмечается со среднегодовой температурой воды в Балтийском море ( $R_{max} = -0.79$ ) на фазовом сдвиге  $-2$  года и с суммарным береговым стоком рек ( $R_{max} = 0.65$ ) на фазовом сдвиге  $-3$  года.

Таблица 3. Оценки взаимного корреляционного анализа среднегодовой изменчивости первичной продукции и океанологических переменных

Переменные	$R_{max}$	Фазовый сдвиг (годы)
$div\bar{V}H$	-0.49	-2
Среднегодовой уровень	-0.47	-1
Береговой сток	0.65	-3
Температура воды	-0.79	-2

### 3. Частотные спектры колебаний первичной продукции

Ограниченность среднемесячных временных рядов первичной продукции (2003–2013) не позволяет надежно выявить колебания с характерными временными масштабами более 5 лет. Оценки спектрального анализа по этим данным свидетельствуют, что в спектрограммах в низкочастотной части помимо доминирующих сезонных колебаний имеются разрешенные пики на частотах, соответствующих

колебаниям с периодами 2.5–3 года (рис. 5). Заметим, что в большинстве случаев выделенные энергонесущие максимумы статистически обеспечены, а боковые полосы симметричны относительно несущей частоты.

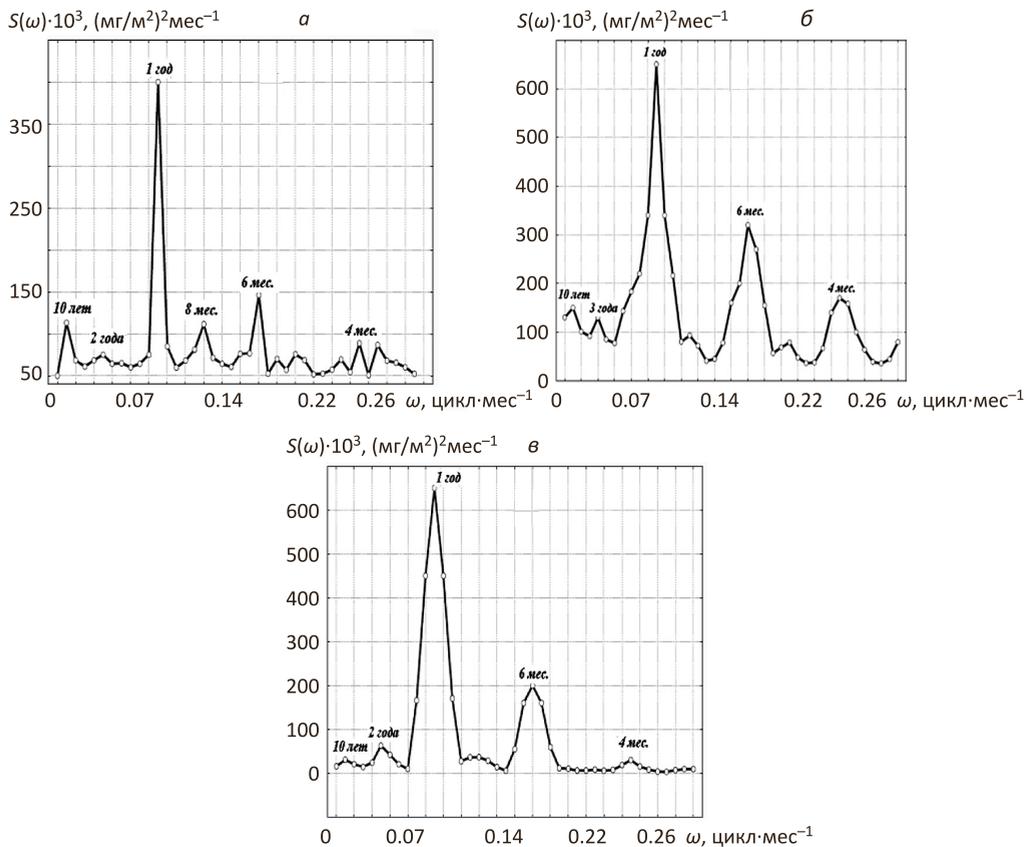


Рис. 5. Спектры рядов среднемесячных значений первичной продукции в районах Балтийского моря в южной (а), центральной (б) и северной частях (в)

Энергия низкочастотных колебаний по акватории моря распределена неравномерно. В спектрах продукции южной части моря подавляющая часть энергии сосредоточена на частотах, соответствующих годовым и полугодовым составляющим. На севере моря вклад долгопериодных возмущений в общую дисперсию изменчивости весьма небольшой. На фоне мощных всплесков энергии на частотах, соответствующих колебаниям с характерным годовым масштабом, они трудно различимы.

Пространственные масштабы сезонных колебаний варьируют от тысяч до нескольких тысяч километров, временные — один год и полгода. Эти колебания вызываются сезонным ходом атмосферных процессов, которые приводят к сезонным изменениям океанологических характеристик: уровня моря, течений, фронтальных зон, плотностной стратификации вод, температуры воды и освещенности.

Вклад сезонных колебаний в изменчивость продукции Балтийского моря является доминирующим. Наиболее существенно сезонная составляющая проявля-

ется в Финском и Рижском заливах (рис. 6). Здесь амплитуда годовых возмущений ПП превышает  $6000 \text{ мгС/м}^2$ , а вклад в общую изменчивость достигает 65%. Области минимальных годовых оценок амплитуды ( $300\text{--}400 \text{ мгС/м}^2$ ) расположены над Готланским желобом, на юго-западе моря и на севере Ботнического залива.

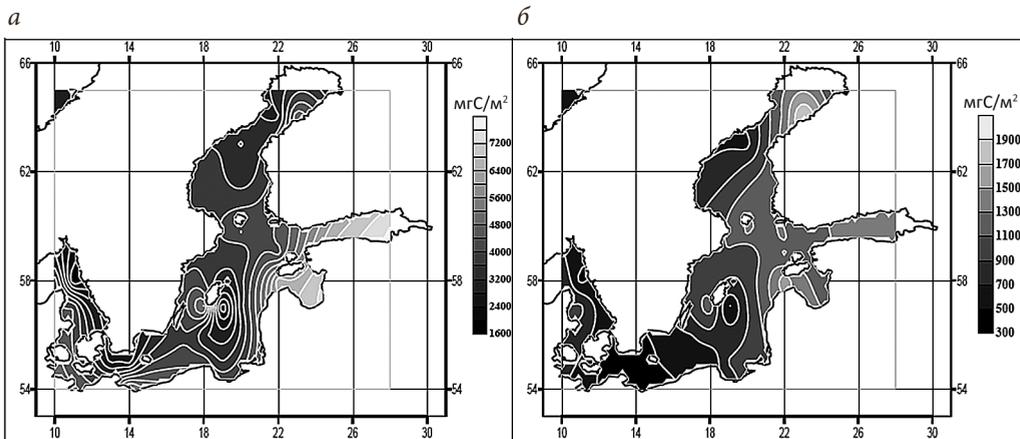


Рис. 6. Распределение амплитуды сезонных колебаний первичной продукции: а — годовых; б — полугодовых

В целом амплитуда годовых колебаний ПП в Балтийском море изменяется от  $1600$  до  $7000 \text{ мгС/м}^2$ , полугодовых — от  $300$  до  $1200 \text{ мгС/м}^2$ .

#### 4. Взаимоспектральный анализ полей продукции и дивергенции полных потоков

Для количественной оценки связи между изменением первичной продукции ( $\frac{\partial P}{\partial t}$ ) и динамическими процессами в Балтийском море был применен взаимный спектральный и взаимный вейвлет анализы. На основе спутниковых данных в узлах регулярной сетки (см. рис. 2) рассчитаны и сформированы временные среднемесячные синхронные ряды оценок дивергенции полных потоков  $div\vec{V}H$  и скорости роста продукции ( $\frac{\partial P}{\partial t}$ ), по которым были оценены взаимные спектральные когерентности и разности фазы.

Частотная характеристика когерентности является аналогом коэффициента регрессии случайных величин, и в рамках теории случайных процессов она устанавливает меру когерентной связи входного и выходного сигналов в линейной системе: отношение амплитуды гармоники выходного сигнала (отклика) к амплитуде входного сигнала заданной частоты.

Рассмотрим оценки взаимоспектрального анализа в стационарном приближении между скоростью роста (уменьшения) первичной продукции ( $\frac{\partial P}{\partial t}$ ) и дивергенцией полного потока ( $div\vec{V}H$ ). Разность фаз для пары  $\frac{\partial P}{\partial t}$ ,  $div\vec{V}H$  на периоде 1 год близка к  $100$  градусам (рис. 7, а), т.е. скорость изменения первичной продукции, отстает на 3 месяца от процессов дивергенции. Функция когерентности на частоте 1 цикл/год изменяется в пределах  $0.88\text{--}0.97$ , что свидетельствует о высокой устойчивости оценки разности фаз (рис. 7, б).

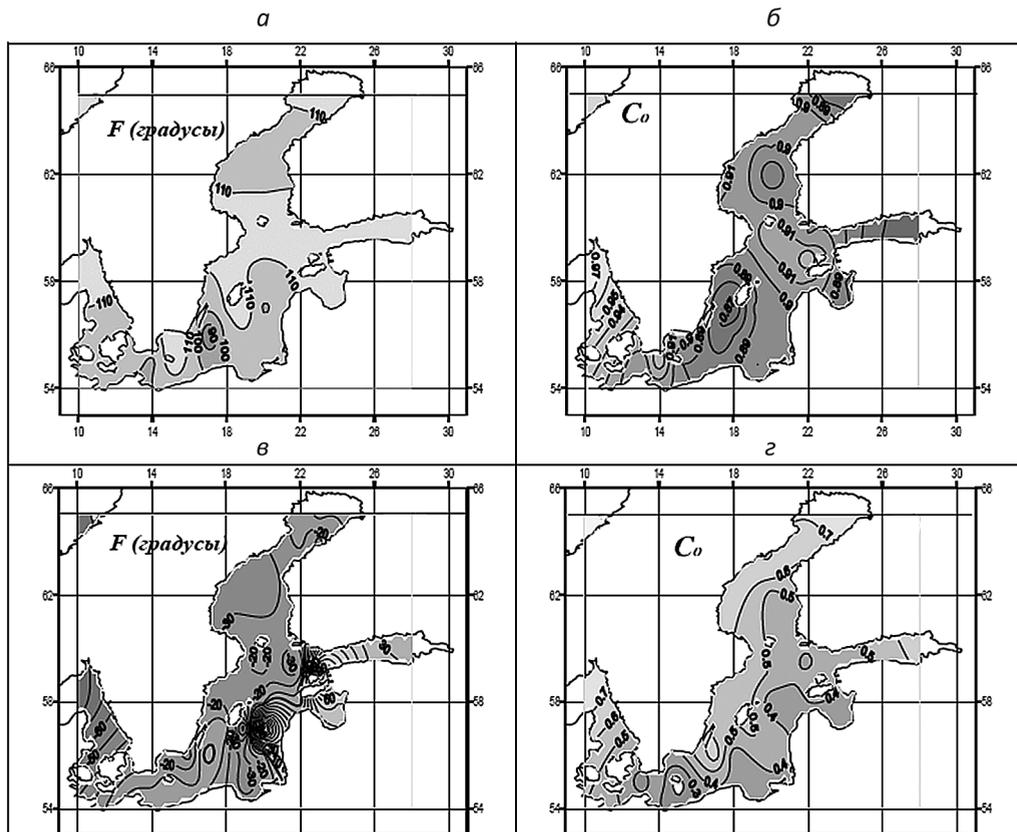


Рис. 7. Пространственное распределение оценок разности фаз и когерентности между скоростью роста первичной продукции ( $\frac{\partial P}{\partial t}$ ) и дивергенцией полного потока ( $div \vec{V}H$ ) для моды с периодом 1 год (а, б) и моды с периодом 6 месяцев (в, з)

Вместе с тем когерентность здесь не превышает 0.4 (рис. 7, з), это означает, что оценка разности фаз между полугодовыми колебаниями  $\frac{\partial P}{\partial t}$  и дивергенцией полных потоков неустойчивая.

В диапазоне частот 2 цикла/год (полугодовых) для этой пары разность фаз на большей части моря оценивается  $-20$  —  $(-30)$  градусов, а когерентность 0.5–0.7. Однако на востоке моря фаза переходит через нуль и наблюдаются положительные оценки разности фаз (рис. 7, в), что свидетельствует о наличии в этой части моря стоячих волн с полугодовым периодом.

Таким образом, взаимоспектральный анализ указывает на нестационарность этих процессов. Существенного обмена энергией между колебаниями с различными пространственно-временными масштабами не отмечается.

Для оценки временной изменчивости частотного спектра зависимости первичной продукции от дивергенции полного потока течений применялся взаимный вейвлет-анализ. На рис. 8 хорошо видно, что наиболее устойчивая связь с когерентностью, достигающей 0.8–0.9, отмечается с гармониками годового периода. Фазовое запаздывание колебаний первичной продукции относительно дивергенции в этом случае составляет 3–6 месяцев. Наиболее тесная связь для всех районов моря от-

мечалась в 2004–2008 гг., затем когерентность сезонных колебаний уменьшается, достигая минимума в период 2009–2010 гг. В 2011 г. вновь увеличивается до 0.7–0.8. На более низких частотах связь между этими характеристиками не выражена.

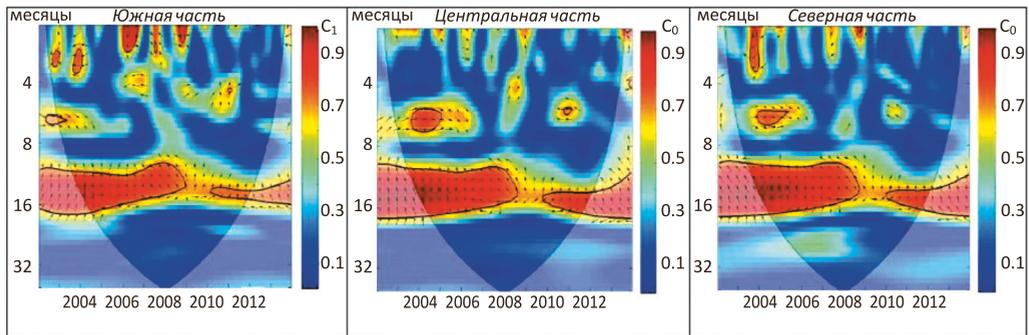


Рис. 8. Распределение вейвлет-когерентности (цветная шкала справа) и разности фаз (стрелки) между скоростью роста первичной продукции ( $\frac{\partial P}{\partial t}$ ) и дивергенцией полного потока ( $div \vec{V}H$ ) в различных районах Балтийского моря.

Жирный черный контур — 95% уровень значимости и конус влияния, где на краях вычислительные эффекты могут исказить изображение

На частотах, соответствующих полугодовым и четырехмесячным колебаниям хорошо выраженная зависимость между дивергенцией потоков течений и обилием первичной продукции отмечается только в отдельные годы.

Наблюдаемая высокая зависимость, выявленная при взаимном вейвлет-анализе потоков первичной продукции с временной изменчивостью величины ПП свидетельствует о значительном вкладе динамики вод в пространственно-временную изменчивость первичной продукции Балтийского моря.

## Выводы

1. Получены статистические оценки колебаний первичной продукции в различных частях Балтийского моря. Показано, что наибольшие значения среднеквадратического отклонения наблюдаются в Финском и Рижском заливах и в юго-западной части моря.

2. На основе спектрального анализа выделены основные периоды изменчивости первичной продукции Балтийского моря: 0.5, 1 год и 2–3 года.

3. Оценен количественный вклад выделенных составляющих в общую энергию колебаний ПП. Показано, что наибольший вклад в суммарную дисперсию первичной продукции в Балтийском море вносит годовая гармоника (до 65 %).

4. Оценена пространственная и временная изменчивость сезонных колебаний первичной продукции на акватории Балтийского моря. Показано, что годовые и полугодовые колебания первичной продукции почти одновременно достигают максимальных значений на всей акватории. В пространственном распределении годовых колебаний ПП Балтийского моря наблюдается возрастание амплитуд от Датских проливов к вершинам Финского и Ботнического заливов.

5. Получены синхронные временные ряды первичной продукции и дивергенции полных потоков течений. На основе взаимоспектрального анализа показано,

что динамические процессы в Балтийском море существенно влияют на изменчивость первичной продукции.

6. Взаимный вейвлет-анализ между скоростью роста первичной продукции и дивергенцией полного потока течений показал, что наиболее устойчивая связь сезонных колебаний отмечалась в период 2004–2008 гг. и в 2011 г. Когерентность в эти отрезки времени была равна 0.8–0.9, а фазовое запаздывание колебаний первичной продукции относительно дивергенции составляло 3–6 месяцев.

## Литература

1. Александров С. В. Первичная продукция планктона в Вислинском и Куршском заливах Балтийского моря и ее связь с рыбопродуктивностью: дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2003. 195 с.

2. Крылова О. И., Науменко Е. Н. Фитопланктон и первичная продукция Вислинского залива // Экологические рыбохозяйственные исследования в Вислинском заливе Балтийского моря: сб. науч. тр. Атлант. НИРО. Калининград, 1992. С. 14–33.

3. Кудрявцева Е. А., Пименов Н. В., Александров С. В., Кудрявцев В. Н. Первичная продукция и хлорофилл в юго-восточной части Балтийского моря в 2003–2007 гг. // Океанология. 2011. Т. 51, № 1. С. 33–41.

4. Феценко О. Б., Бочаров Л. Н. Семантическая модель формирования концентрации промысловых гидробионтов, основанная на концепции оптимального пищевого поведения // Вопросы рыболовства. 2002. Т. 3, № 5(9). С. 149–161.

5. Старицын Д. К., Фукс В. Р., Филатов В. Н. Опыт использования спутниковой альтиметрической информации для оценки океанологических условий промысла сайры // Изв. ТИНРО. 2004. Т. 3. С. 398–408.

6. Старицын Д. К., Фукс В. Р. Анализ особенностей океанологических условий северо-западной части Тихого океана в 2002–2004 гг. на основе спутниковых вдольтрековых альтиметрических измерений // Вестн. С.-Петербург. гос. ун-та. Сер. 7. 2005. № 2. С. 32–39.

7. Behrenfeld M., Falkowski P. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // Limnology and Oceanography. 1997. Vol. 42. P. 1–20.

8. Behrenfeld M., Falkowski P. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models // Limnology and Oceanography. 1997. Vol. 42. P. 1479–1491.

9. Stramska M., Zuzewicz A. Comparison of primary productivity estimates in the Baltic Sea based on the DESAMBEM algorithm with estimates based on other similar algorithms // OCEANOLOGIA. 2013. Vol. 55 (1). P. 77–100.

10. Елизарова В. А. Хлорофилл как показатель биомассы фитопланктона // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 126–131.

11. Киселев И. А. Планктон морей и континентальных водоемов. Общие вопросы планктологии. Т. 1. Л.: Наука Ленингр. отд., 1969. 658 с.

12. Петренко Д. А., Поздняков Д. В., Петтерсон Л. Х., Кармен Л. Н. Оценки адекватности дистанционного определения первичной продукции в Арктическом океане, по данным SeaWiFS и MODIS-AQUA // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 24. С. 137–161.

13. Карасева Е. М., Иванович В. М. Вертикальное распределение икры и личинок балтийского шпрота *Sprattus sprattus balticus* (Clupeidae) в связи с сезонной и суточной изменчивостью // Вопросы ихтиологии. 2010. Т. 50, № 2. С. 240–250.

14. Проект «Моря СССР» Т. III. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 450 с.

**Для цитирования:** Старицын Д. К., Фукс В. Р. Пространственно-временная изменчивость статистических характеристик первичной продукции в Балтийском море на основе спутниковой информации // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2017. Т. 62. Вып. 1. С. 104–116. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.107.

## References

1. Aleksandrov S. V. *Pervichnaja produkcija planktona v Vislinskom i Kurshskom zalivakh Baltiiskogo moria i ee svjaz' s rybobroduktivnost'ju. Dis. kand. biol. nauk [Primary production of plankton in the Vistula*

and Curonian gulf's of the Baltic sea and its relation to fish productivity. Diss. PhD]. St. Petersburg, 2003. 195 p. (In Russian)

2. Krylova O. I., Naymenko E. N. [Phytoplankton and primary production of the Vistula gulf's]. *Ekologicheskie rybkhoziaistvennyye issledovaniia v Vislinskoi zalive Baltiiskogo moria*: sb. nauch. tr. Atlant NIRO [перевод]. Kaliningrad, 1992, pp. 14–33. (In Russian)

3. Kydryavtseva E. A., Pimenov N. V., Alexandrov S. V., Kudryavtsev V. N. Pervichnaia produktsiia i khlorofil v iugo-vostochnoi chasti Baltiiskogo moria v 2003–2007 gg. [Primary production and chlorophyll in the south-eastern part of the Baltic Sea in 2003–2007]. *Okeanologiya*, 2011, vol. 51, no. 1, pp. 33–41. (In Russian)

4. Feshenko O. B., Bocharov L. N. Semanticheskaia model' formirovaniia kontsentratsii promyslovykh gidrobiontov, osnovannaia na kontseptsii optimal'nogo pishchevogo povedeniia [The semantic model of the formation of concentrations of commercial species based on the concept of optimal feeding behavior]. *Voprosy rybolovstva*, 2002, vol. 3, no. 5 (9), pp. 149–161. (In Russian)

5. Staritsyn D. K., Fuks V. R., Filatov V. N. Opyt ispol'zovaniia sputnikovoi al'timetricheskoi informatsii dlia otsenki okeanologicheskikh uslovii promysla sairy [Experience of using satellite altimetry data to assess the Oceanographic conditions of fishing saury]. *Izvestiia TINRO*, 2004, vol. 3, pp. 398–408. (In Russian)

6. Staritsyn D. K., Fuks V. R. Analiz osobennostei okeanologicheskikh uslovii severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana v 2002–2004 gg. na osnove sputnikovyykh vdol'trekovykh al'timetricheskikh izmerenii [Analysis of the characteristics of the Oceanographic conditions of the North-Western Pacific ocean in 2002–2004 on the basis of satellite altimetry measurements]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology and Geography*, 2005, issue 2, pp. 32–39. (In Russian)

7. Behrenfeld M., Falkowski P. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 1997, vol. 42, pp. 1–20.

8. Behrenfeld M., Falkowski P. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnology and Oceanography*, 1997, vol. 42, pp. 1479–1491.

9. Stramska M., Zuzewicz A. Comparison of primary productivity estimates in the Baltic Sea based on the DESAMBEM algorithm with estimates based on other similar algorithms. *OCEANOLOGIA*, 2013, vol. 55 (1), pp. 77–100.

10. Elizarova V. A. [Chlorophyll as an indicator of phytoplankton biomass]. *Metodicheskie voprosy izucheniia pervichnoi produktsii planktona vnutrennikh vodoemov* [перевод]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993, pp. 126–131. (In Russian)

11. Kiselev I. A. *Plankton morei i kontinental'nykh vodoemov. Obshchie voprosy planktologii* [The plankton of seas and continental water bodies. General issues of planktologie]. Leningrad, Nauka Publ., 1969, vol. 1. 658 p. (In Russian)

12. Petrenko D. A., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H., Karlin L. N. Otsenki adekvatnosti distantsionnogo opredeleniia pervichnoi produktsii v Arkticheskom okeane, po dannym SeaWIFS i MODIS-AQUA [Assessment of the adequacy of algorithms of the retrieval of primary production in the Arctic from satellite ocean colour data]. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal*. Issue 24. St. Petersburg, RSHU Publishers, 2012, pp. 137–161. (In Russian)

13. Karaseva E. M., Ivanovich V. M. Vertikal'noe raspredelenie ikry i lichinok baltiiskogo shprota *Sprattus sprattus balticus* (Clupeidae) v sviazi s sezonnoi i sutochnoi izmenchivost'iu [Vertical distribution of eggs and larvae of Baltic sprat *Sprattus sprattus balticus* (Clupeidae) in relation to seasonal and daily variation]. *Voprosy iktiologii*, 2010, no. 50(2), pp. 240–250. (In Russian)

14. *Proekt "Moria SSSR". T. III. Baltiiskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviia [Seas of the USSR. Hydrometeorology and hydrochemistry of seas of the USSR. Volume III. Of the Baltic sea. Issue 1.]*. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1997. 450 p. (In Russian)

**For citation:** Staritsyn D. K., Fuks V. R. Spatial-temporal variability of the primary production statistics over the Baltic Sea by means of satellite information. *Vestnik SPbSU. Earth Sciences*, 2017, vol. 62, issue 1, pp. 104–116. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.107.

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2016 г.

Статья рекомендована в печать 1 марта 2017 г.

#### Контактная информация

Старицын Дмитрий Константинович — доцент; st036@yandex.ru

Фукс Виктор Робертович — профессор; victorvf1285@yandex.ru

Staritsyn Dmitry K. — Associate Professor; st036@yandex.ru

Fuks Viktor R. — Professor; victorvf1285@yandex.ru