Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
СПб Филиал

OCEAN.RU

Russian Academy of Sciences
P.P.Shirshov Institute of Oceanology

Влияние ледового покрова на первичную продукцию высокоширотных морей

В.А. Рябченко, А.Ю. Дворников, С. Д. Мартьянов, С.М. Гордеева

III Всероссийская молодежная
конференция "Комплексные исследования Мирового Океана"
(КИМО-2018)
СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, 21–25 мая 2018 г

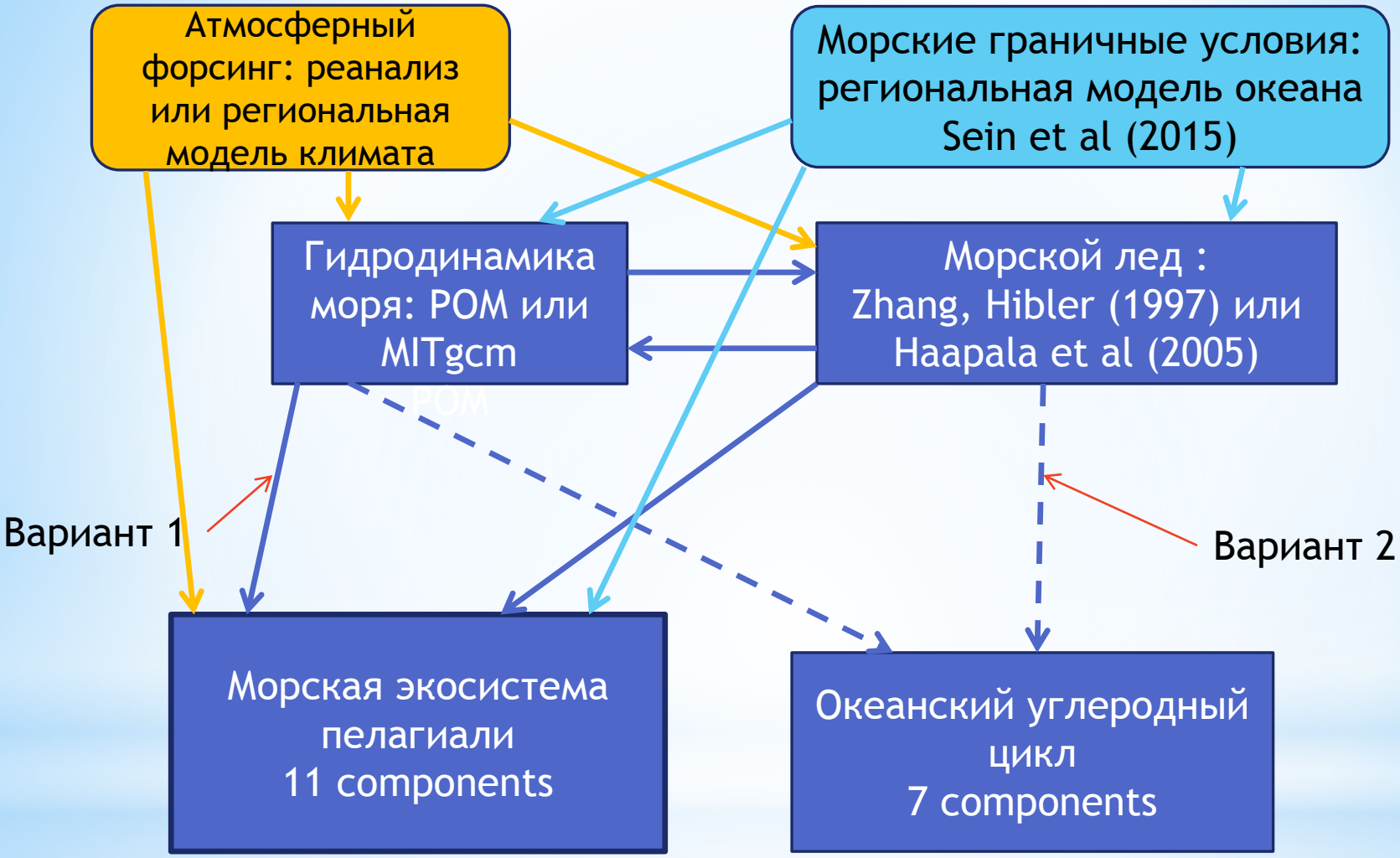
Цель исследования

- По прогнозам, к 2030 году лед в Арктическом бассейне летом исчезнет полностью
- Согласно наблюдениям, доля Баренцева моря, покрытого льдом, в период максимального развития ледяного покрова (март-апрель) составляет за весь период наблюдения 62%, за последние 30 лет - 54%, а за первые 12 лет XXI века - 50%
- Сокращение ледяного покрова приводит к увеличению вегетационного периода и увеличению первичной продукции.

В конце XX века появились спутниковые данные о поверхностной концентрации хлорофилла «а» и оценки годовой первичной продукции фитопланктона. Эти оценки для Арктического бассейна и его морей занижены из-за районов, покрытых льдом, в которых такие спутниковые наблюдения невозможны.

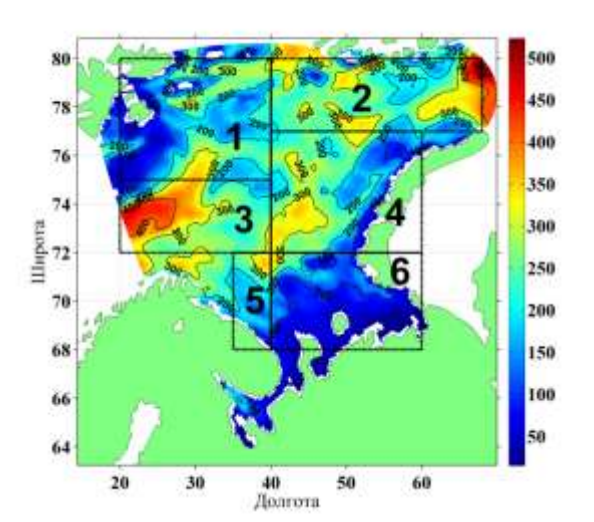
Цель исследования – выяснить взаимосвязь площади морского льда и первичной продукции в арктических морях , используя трехмерные эко-гидродинамические модели морей.

Структура эко-гидродинамических моделей

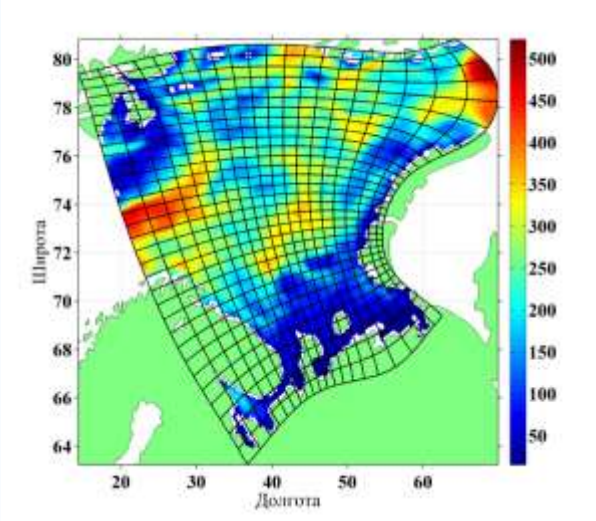


Эко-гидродинамическая модель Баренцева моря (EHBARSEM): модельная область, поле глубин, сетка

A



B



Поле глубин (a) и горизонтальная сетка EHBARSEM (b). Шесть морских районов на фрагменте *a* выделены по Думанской (2014).

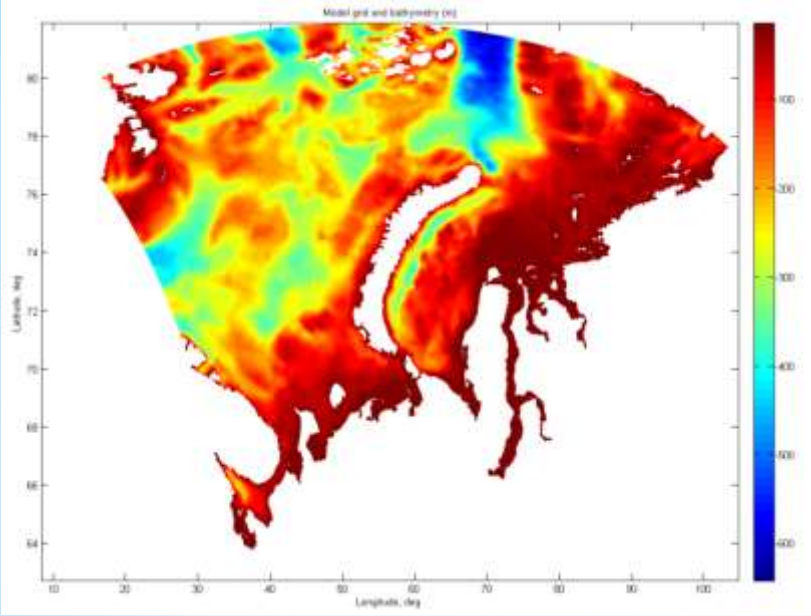
Параметры модельной сетки

Число ячеек	Шаг по долготе, км	Шаг по широте, км	Максимальная глубина, м	Минимальная глубина, м
140×160	4.4-20.4	6.0-27.7	523	15

Число σ-уровней = 25.

Эко-гидродинамическая модель Баренцева, Карского и Белого морей :

модельная область, поле глубин, сетка

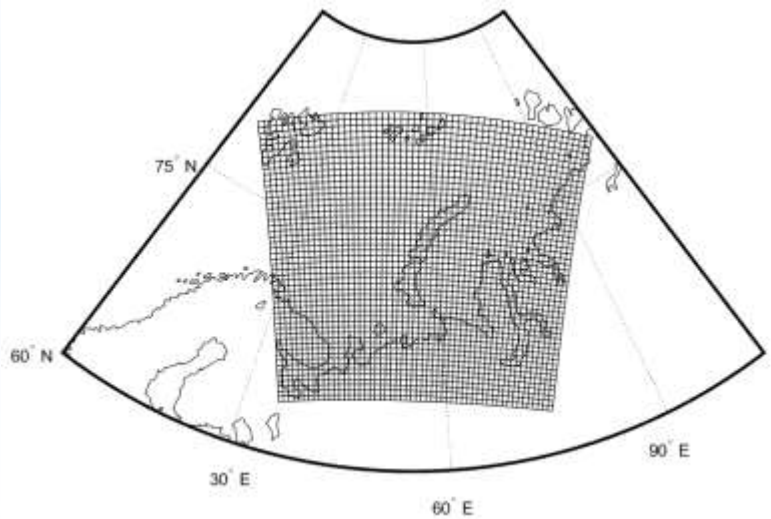


Станции наблюдений: вблизи Шпицбергена (Sval_2: 2001), в Баренцевом море (Bar_5: 1993), в Печорском море (Pech_8: 1993), в Карском море южнее и восточнее Новой Земли (Kara_1 и KaraE_1: 1993).

Число узлов 544 x 518 = 281 792

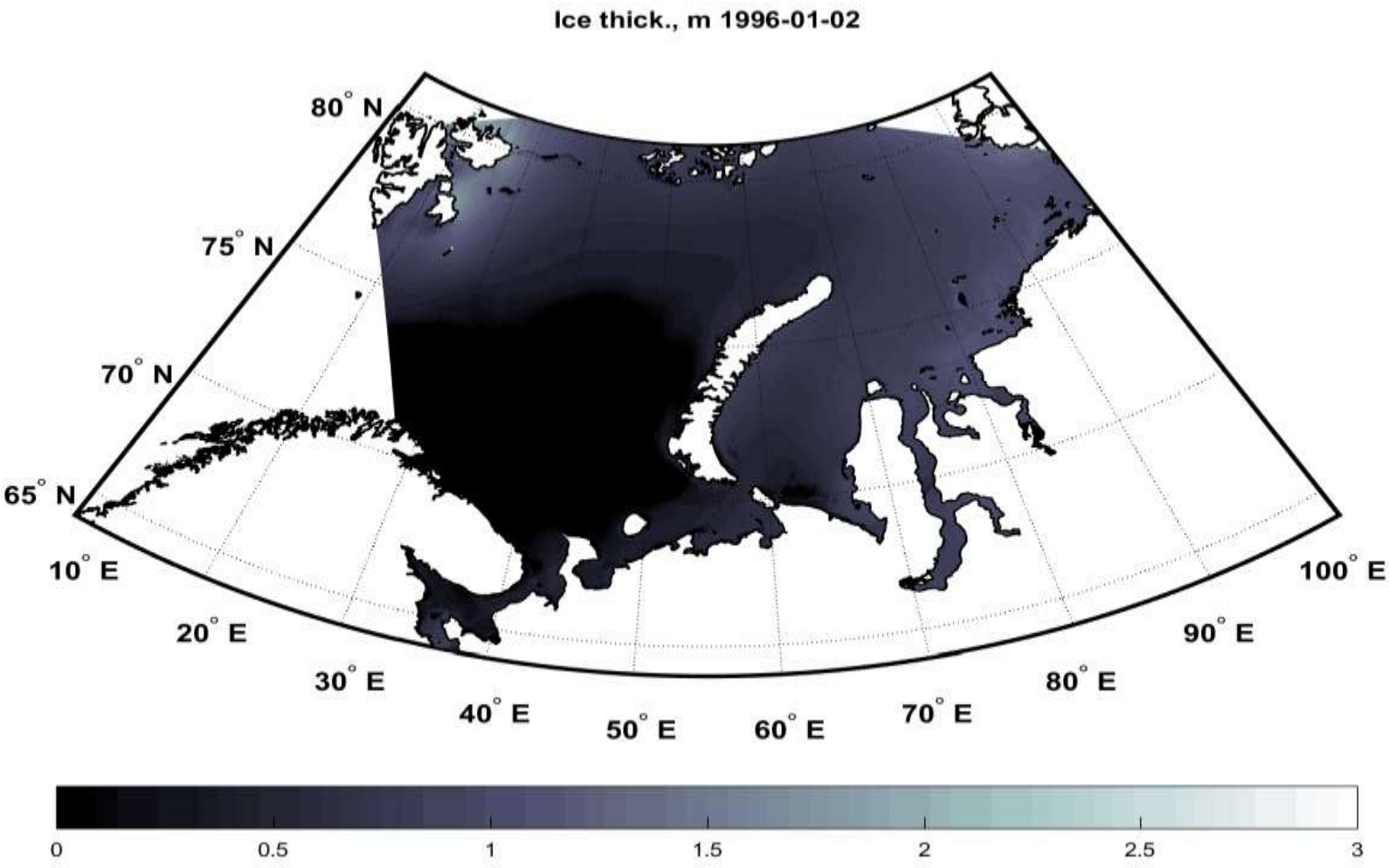
Шаг по долготе = 3660-3705 м

Шаг по широте = 3706.5 м



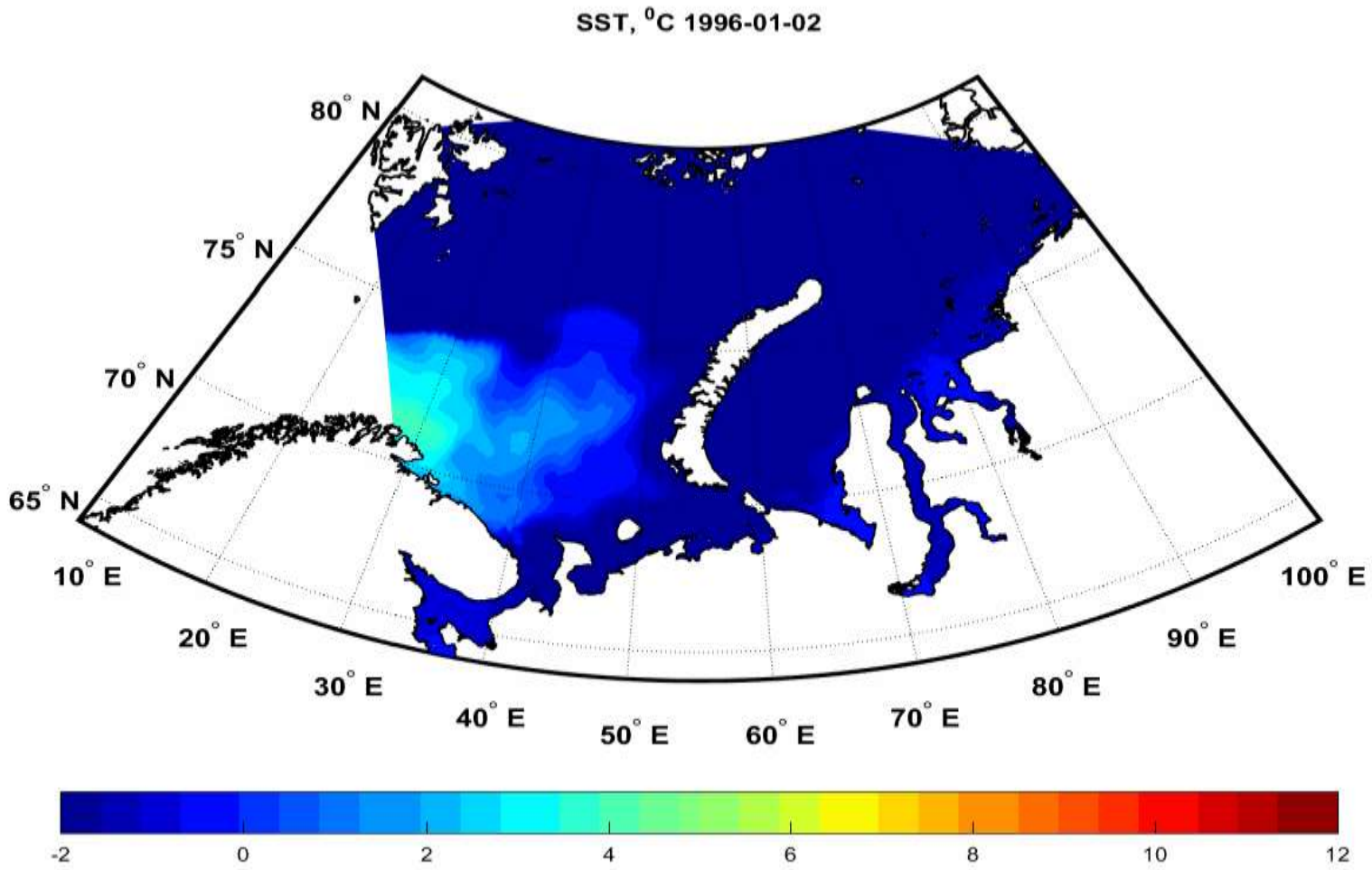
Расчет по второй модели для периода 1966-2005гг.

Распределение толщины льда(м) **в Баренцевом, Карском и Белом морях в течение первой половины 1996 г.**



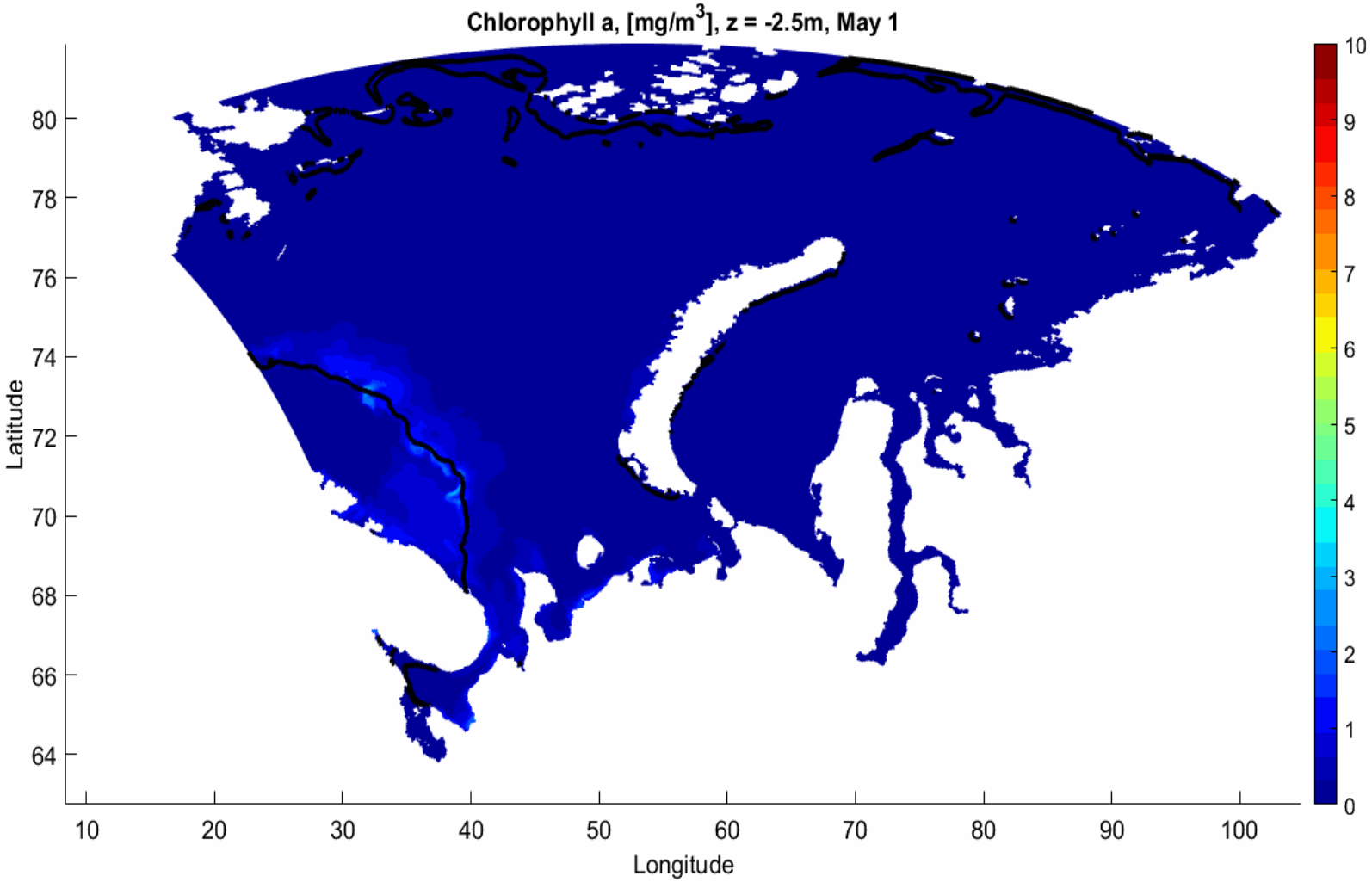
Расчет по второй модели для периода 1966-2005гг.

Температура поверхности моря (°С) в Баренцевом, Карском и Белом морях в 1996г.



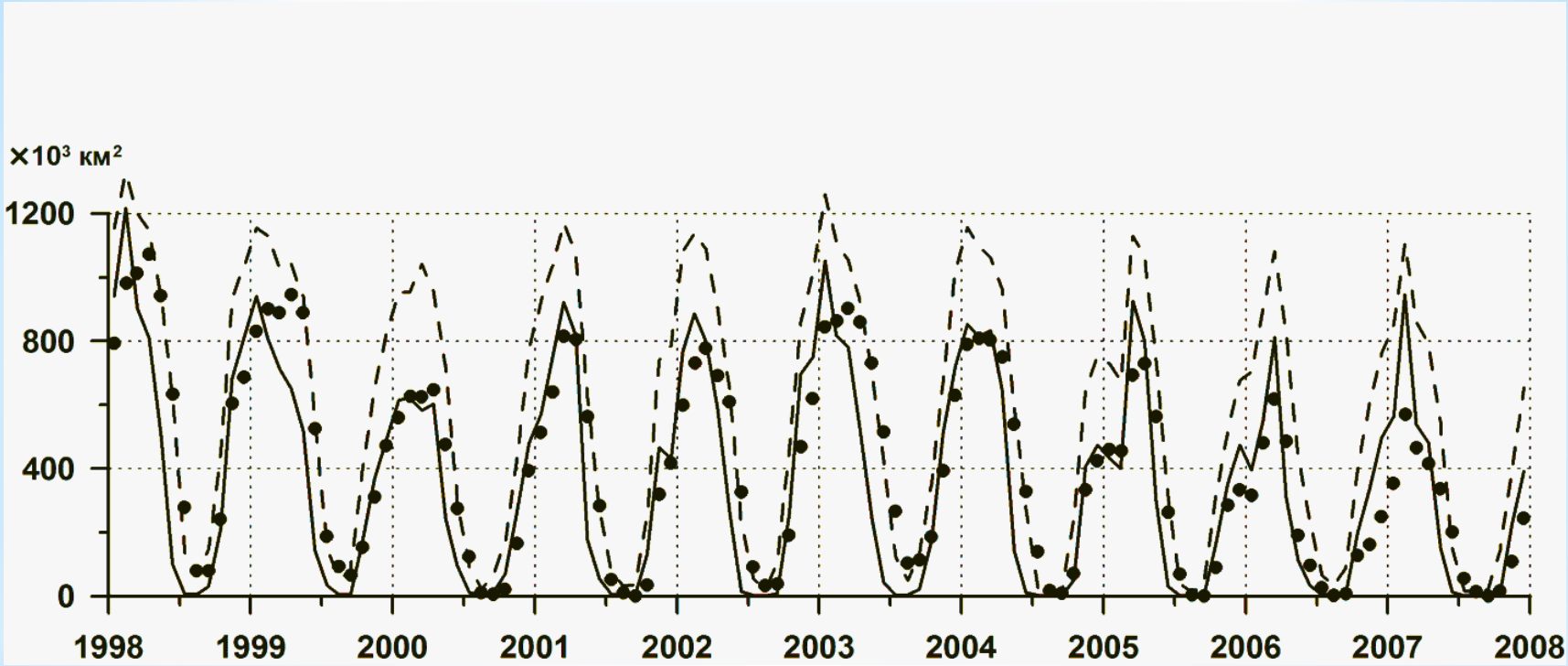
Расчет по второй модели для периода 1966-2005гг.

Рассчитанная концентрация хлорофилла-а в поверхностном слое и положение изолинии сплоченности льда 0.8 (кромка льда) в 2005г.



Расчет по первой модели 1998-2007гг.

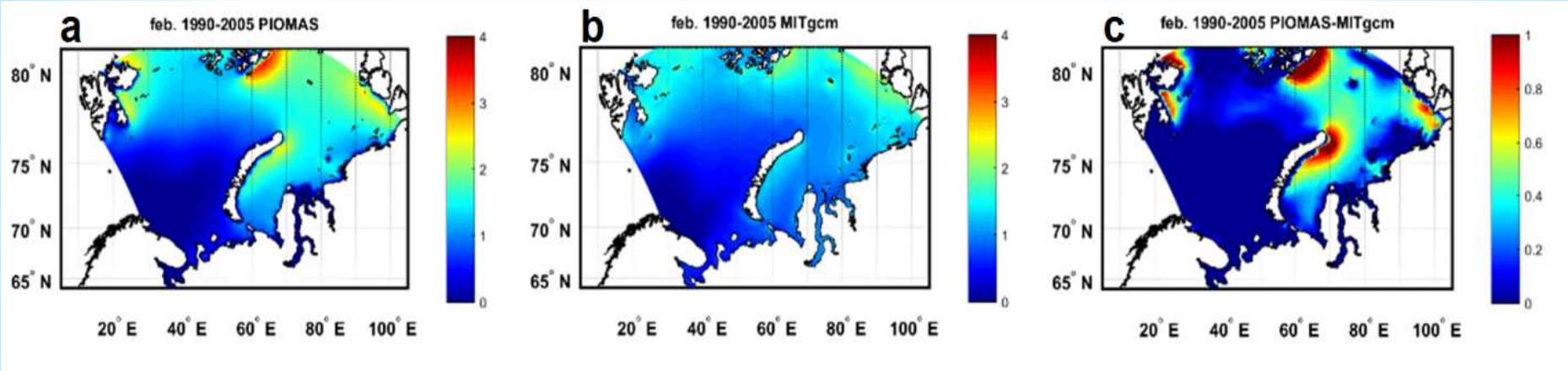
Средняя месячная площадь морского льда в Баренцевом море



Точки - оценка с использованием данных о площади морского льда, полученных с помощью СВЧ-зондирования http://nsidc.org/data/G02202,
сплошная и пунктирная кривые - результаты расчета пакового льда (концентрация льда Ci> 0.8) и паковый лед + маргинальная зона льда (Ci ≥ 0.15).

Расчет по второй модели для периода 1966-2005гг.

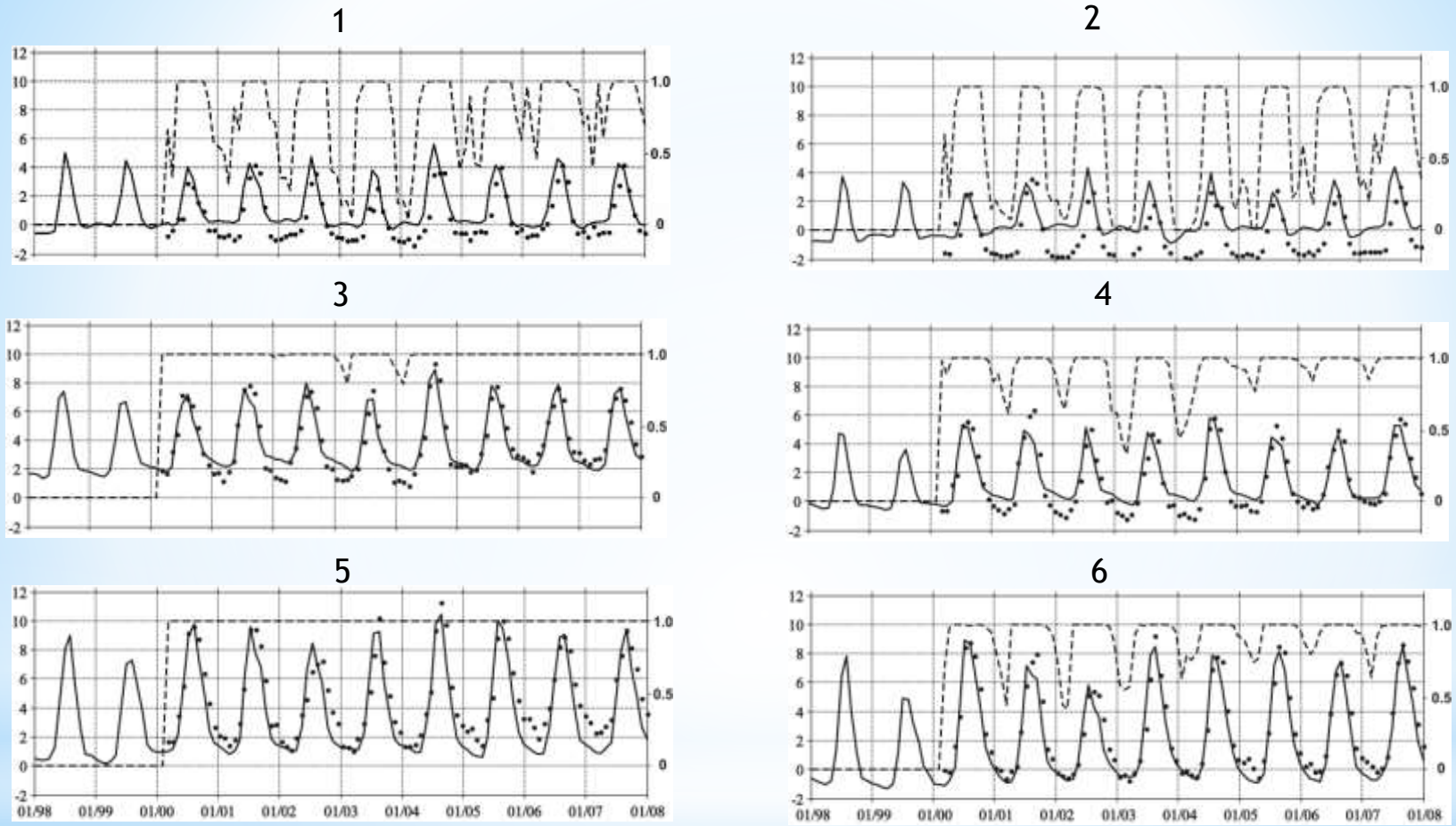
Среднемесячная толщина льда (м) в феврале в Баренцевом и Карском морях, осредненная за период 1990-2005 гг.



(a) Данные архива PIOMAS; (b) результаты модели; (c) разность (PIOMAS - модель)

Модель занижает результаты реанализа толщины морского льда в Арктике (архиве PIOMAS) вблизи берегов островов, окруженных припайным льдом. Для модельного бассейна в целом средняя годовая расчетная толщина и площадь льда за 1990-2005 годы меньше их значений по данным PIOMAS, соответственно, на 3.9% и 1%.

Средняя месячная температура поверхности моря, ТПМ (° С) в 6 районах Баренцева моря в 1998-2007 гг.



Фрагменты 1-6 соответствуют районам на рис.1. Сплошные линии - результаты расчета, точки - данные MODIS Terra http: //oceancolor.gsfc/nasa.gov/cgi/l3. Пунктир - доля открытой воды в районе (правая шкала), т. е. отношение количества точек сетки, для которых выполняется сравнение спутниковых и расчетных данных, и общего количества точек в районе.

Расчет для 1966-2005гг.

Вертикальные профили концентрации хлорофилла-а Chla [mg / m^3] **и первичной продукции PP** [mg C /m^3 /day] для различных точек и дат:

Сплошная линия - модель, пунктирная - наблюдения.

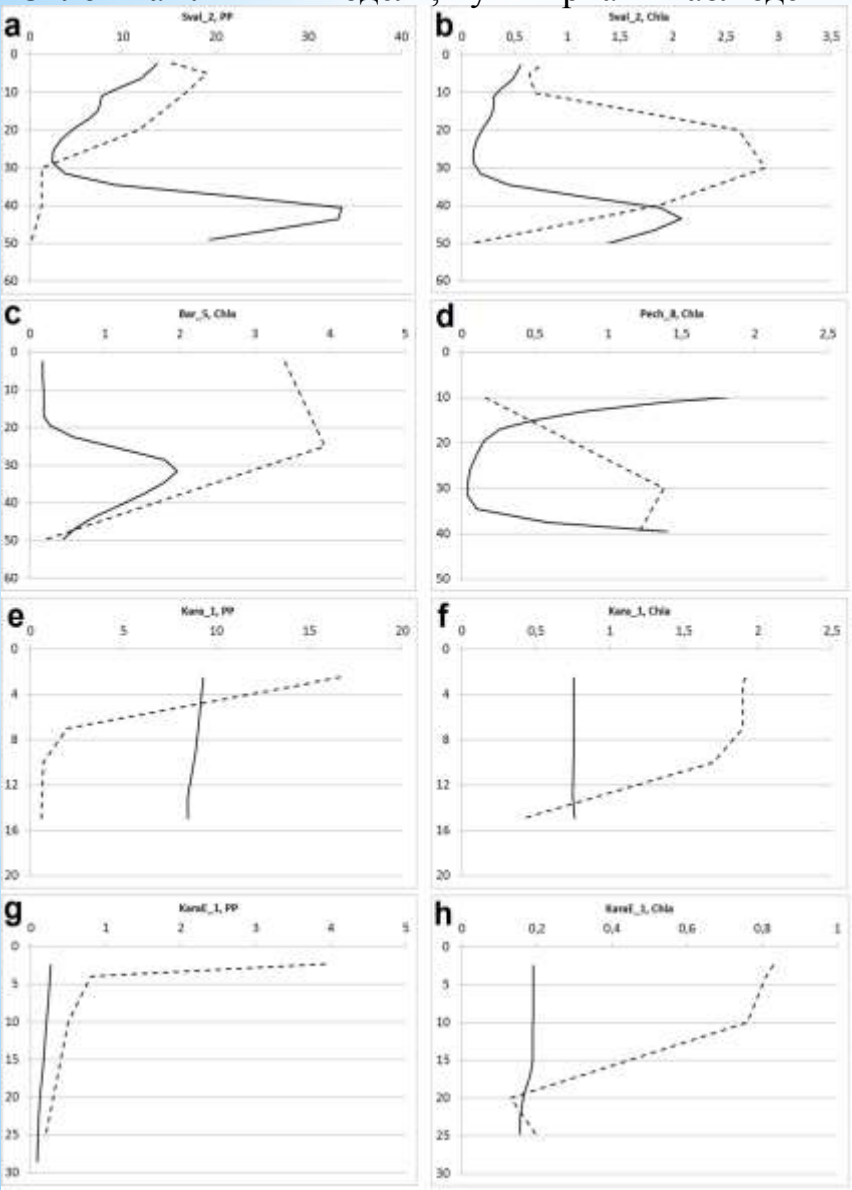


Таблица. Функция качества (cost function) для модельных и измеренных данных по первичной продукции (PP) и концентрации хлорофилла-а (Chla). Прочерк - отсутствие данных наблюдений.

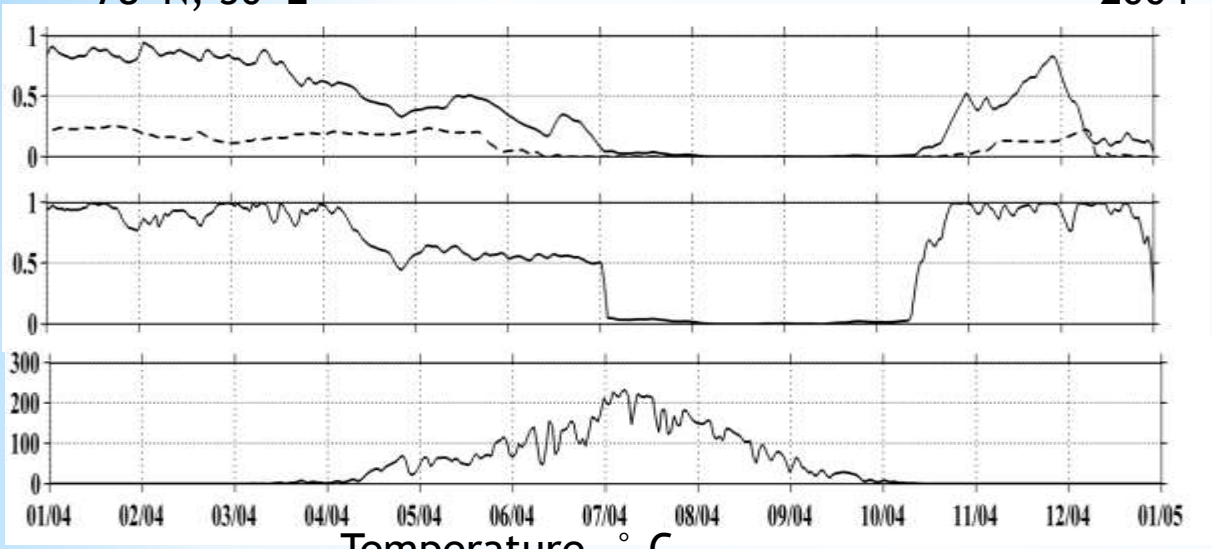
	Sval_2	Bar_5	Pech_8	Kara_1	KaraE_1
PP	0.36	-	-	0.16	0.59
Chla	0.63	0.85	0.65	1.23	1.05

$$C = \left|\frac{M - D}{S}\right|$$

M – среднее по вертикали значение рассчитанной характеристики, D – среднее по вертикали значение измеренной характеристики, S – стандартное отклонение измеренной характеристики. Критерии соответствия модели и данных: $0 < C \leq 1$ – очень хорошее, $1 < C \leq 2$ – хорошее, $2 < C \leq 3$ – удовлетворительное, $C > 3$ – плохое.

Типичная временная эволюция модельных характеристик в верхнем слое моря маргинальной зоны льда (МЗЛ)

78°N, 50°E 2004

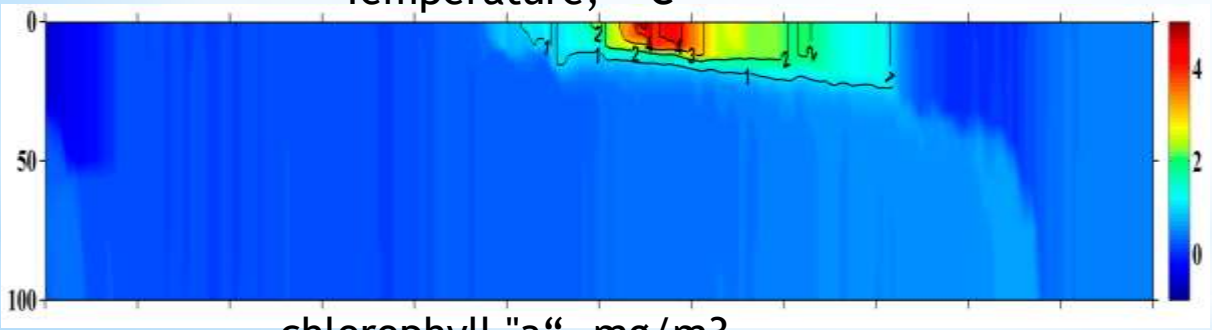


Толщина льда(м) - сплошная
Толщина снега (м) - пунктир

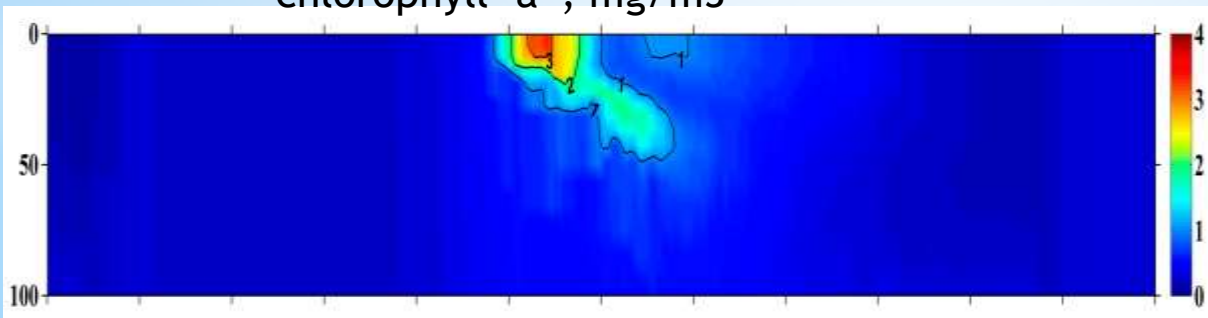
Ci - Сплоченность льда

коротковолновая солнечная радиация (КСР), Вт/м2

Temperature, ° C



chlorophyll "a“, mg/m3



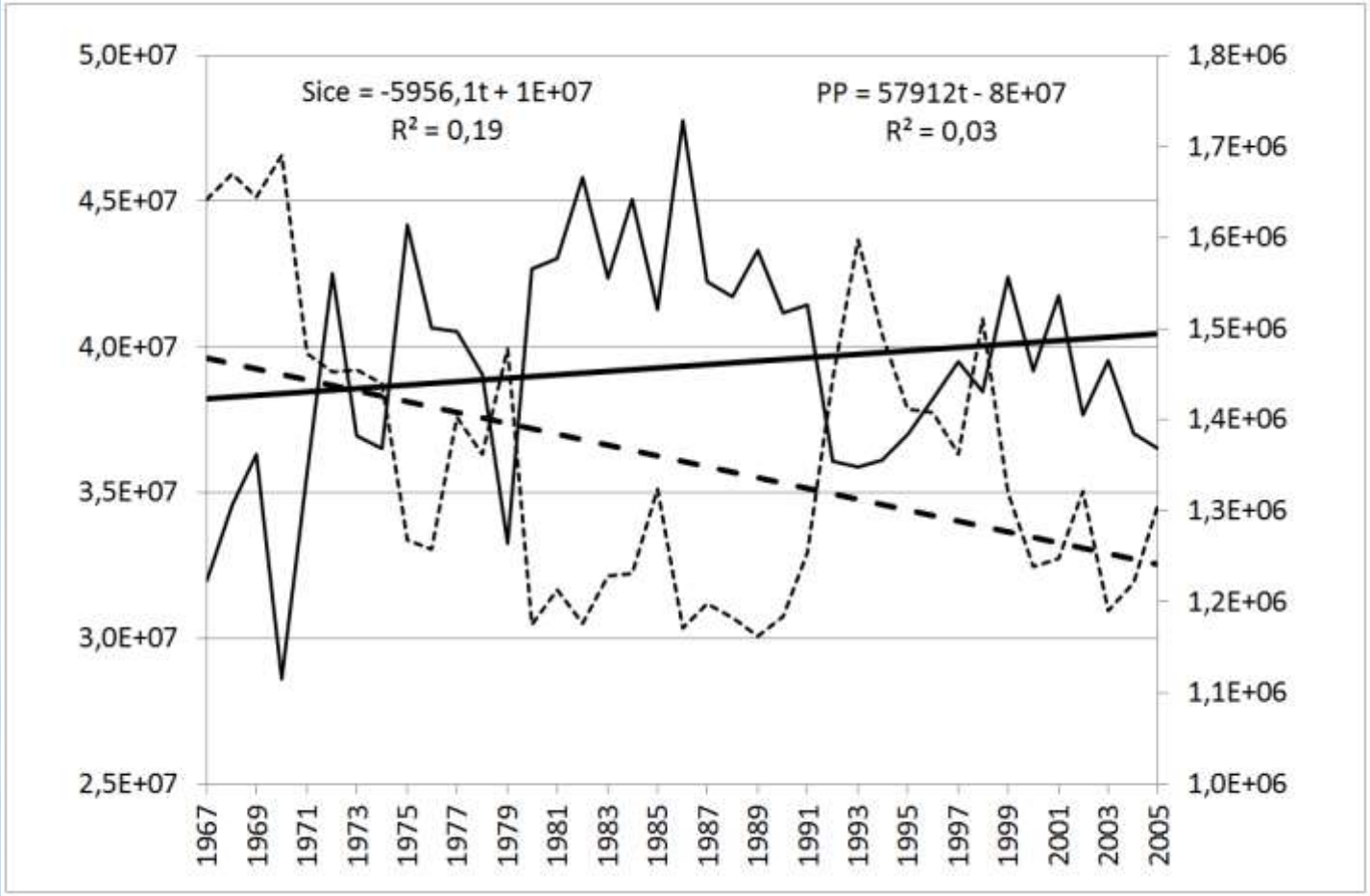
Цветение начинается, когда КСВ достигает ≈ 100 Вт $м^{-2}$ (в открытой воде или в МЗЛ при Ci ≈ 0,5 и hi ≈ 0). Образование ВКС толщиной ≈ 15 м в середине июня и развитие термоклина привели к истощению нитратов и других биогенов в ВКС и образованию подповерхностного максимума хлорофилла, который существовал до конца июля.

Таблица. Расчетное максимальное значение площади льда в течение года (Si); среднегодовая первичная продукция APP по модельным (APPmod) и спутниковым данным (APPdata), часть (%) расчетной среднегодовой первичной продукции, производимой на открытой воде (APPopen), в маргинальной зоне льда (APPmiz), под паковым льдом (APPpi), и в верхнем 20-метровом слое (APP20m) в отдельные годы периода 1998-2007 гг.

Year	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
S_i, 10^3 km^2	1360	1240	1210	1270	1220	1335	1240	1170	1130	1170
APP_{mod}, TgC y^{-1}	155	156	175	177	186	171	181	173	183	186
APP_{data}, TgC y^{-1}	87	69	111	101	91	92	116	107	125	115
APP_{mod}/APP_{data}	1.78	2.26	1.57	1.75	2.04	1.86	1.56	1.62	1.46	1.61
APP_{open}, %	62	69	79	80	78	65	79	77	80	84
APP_{miz}, %	31	24	16	16	18	31	17	19	17	12
APP_{pi}, %	7	7	5	4	4	4	4	4	3	4
APP_{20m}, %	56	55	56	55	55	55	55	56	55	55

Расчет для 1966-2005гг.

Межгодовая изменчивость средних за гидрологический год (с октября по сентябрь) интегральной первичной продукции (сплошная линия, [ммоль N/с], левая шкала) и суммарной площади льда (пунктир, [км^2], правая шкала) в модельной области.



Для первичной продукции – тренд незначимый (р-уровень = 0.30), для площади льда – значимый (р-уровень = 0.006).

В период 1966-1992 гг. обе характеристики изменяются в противофазе и тренды их значимы и противоположны. Начиная с 1993 гг., несмотря на сохраняющуюся оппозицию двух характеристик, тренды уменьшается, в частности, тренд первичной продукции исчезает.

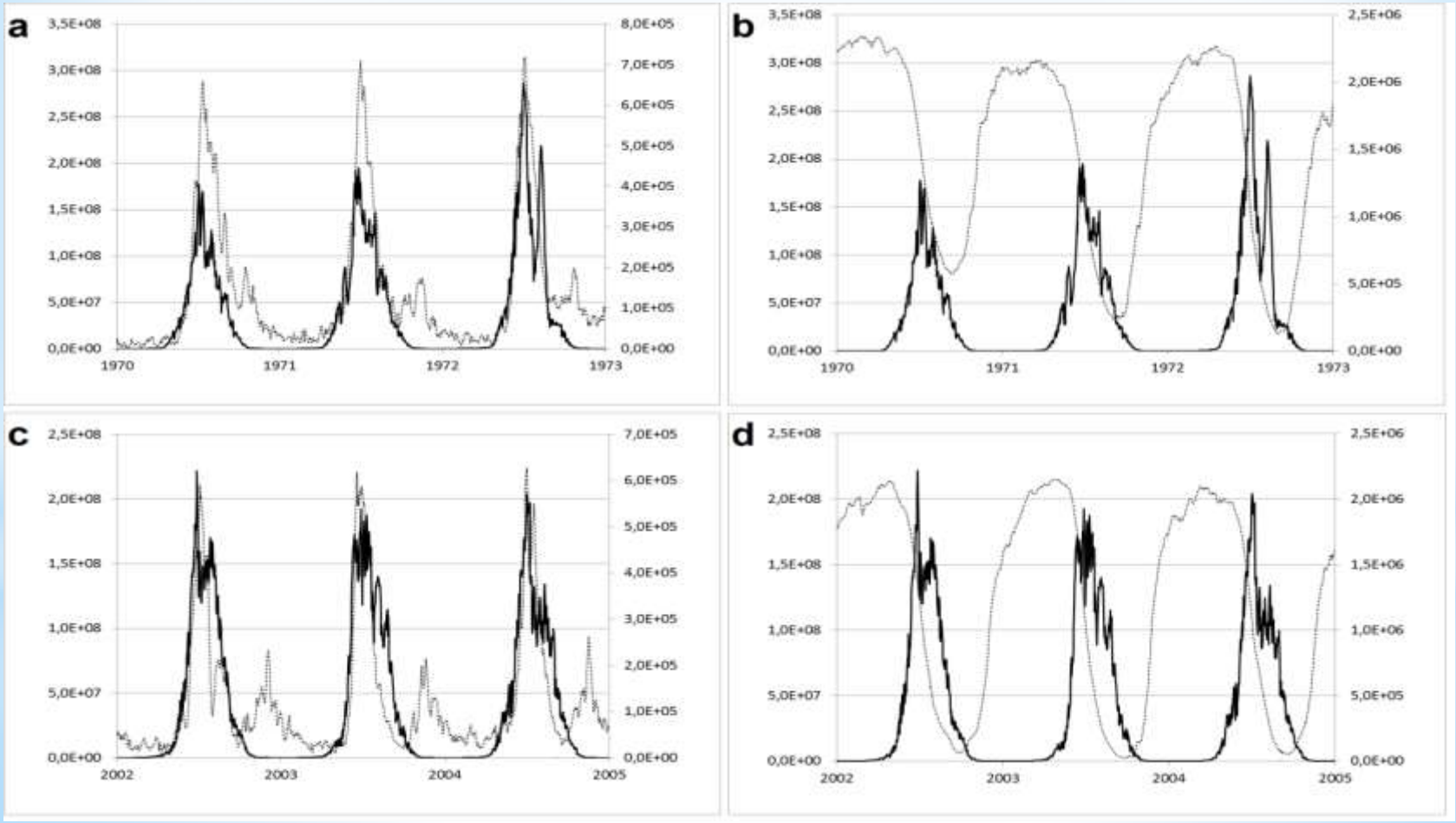
Внутригодовой ход интегральной по модельной области первичной продукции (сплошные линии**), площади маргинальной зоны льда и общей площади льда (**пунктирные линии**)**

a) PP и Smiz, 1970-1972 гг.;

R=0.87

b) PP и Sice, 1970-1972 гг.;

R=-0.36



c) PP и Smiz, 2002-2004 гг.;

d) PP и Sice, 2002-2004 гг.

Выводы

1. Модельные оценки годовой первичной продукции (APP) для Баренцева моря оказались в 1,5-2,3 раза больше, чем аналогичные оценки по спутниковым данным.
2. Основными причинами этого несоответствия являются:

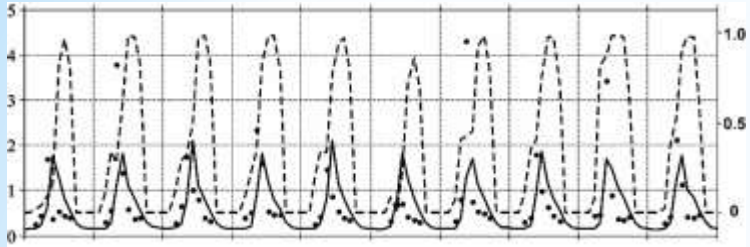
- спутниковые оценки относятся к открытой воде, в то время как модельные оценки - ко всему морскому району (под паковым льдом и в маргинальной зоне льда зоне производится 16 - 38% APP);
- Спутниковые оценки занижены, т.к. не учитывают подповерхностный максимум хлорофилла.

3. Существует высокая корреляция между площадью маргинальной зоны льда и годовой первичной продукцией Баренцева и Карского морей.

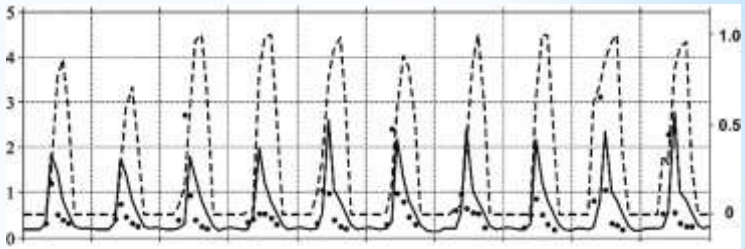
4. Межгодовая изменчивость средних за гидрологический год (с октября по сентябрь) первичной продукции и суммарной площади льда, демонстрирует противофазность, что означает, что малая ледовитость в предшествующую зиму является основной причиной увеличения первичной продукции в текущем году.

Monthly average concentration of chlorophyll "a" (mg m^{-3}) on the surface in 6 different areas of the Barents Sea in 1998-2007.

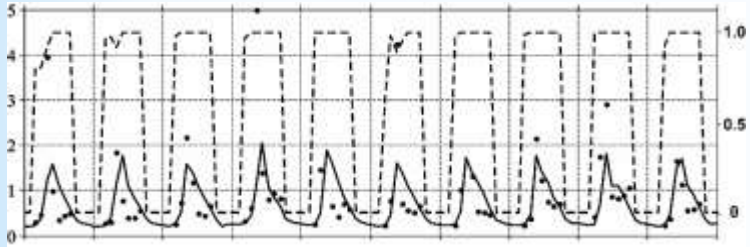
1



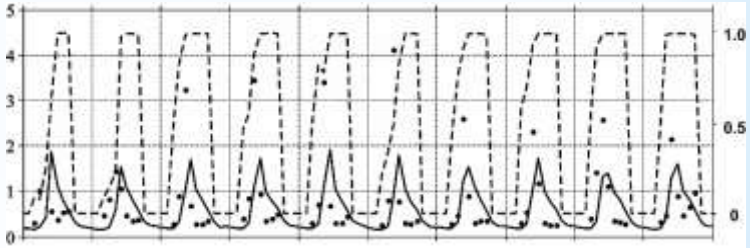
2



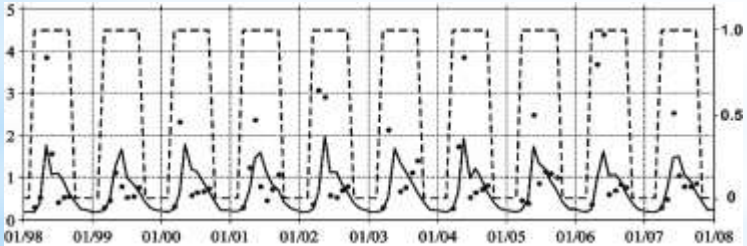
3



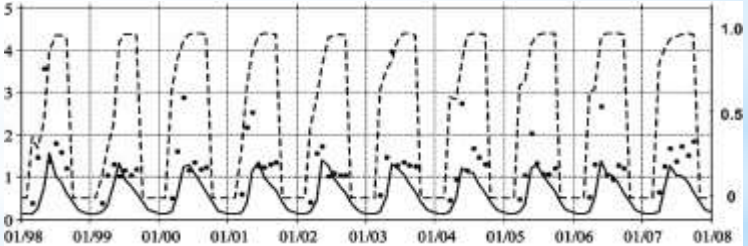
4



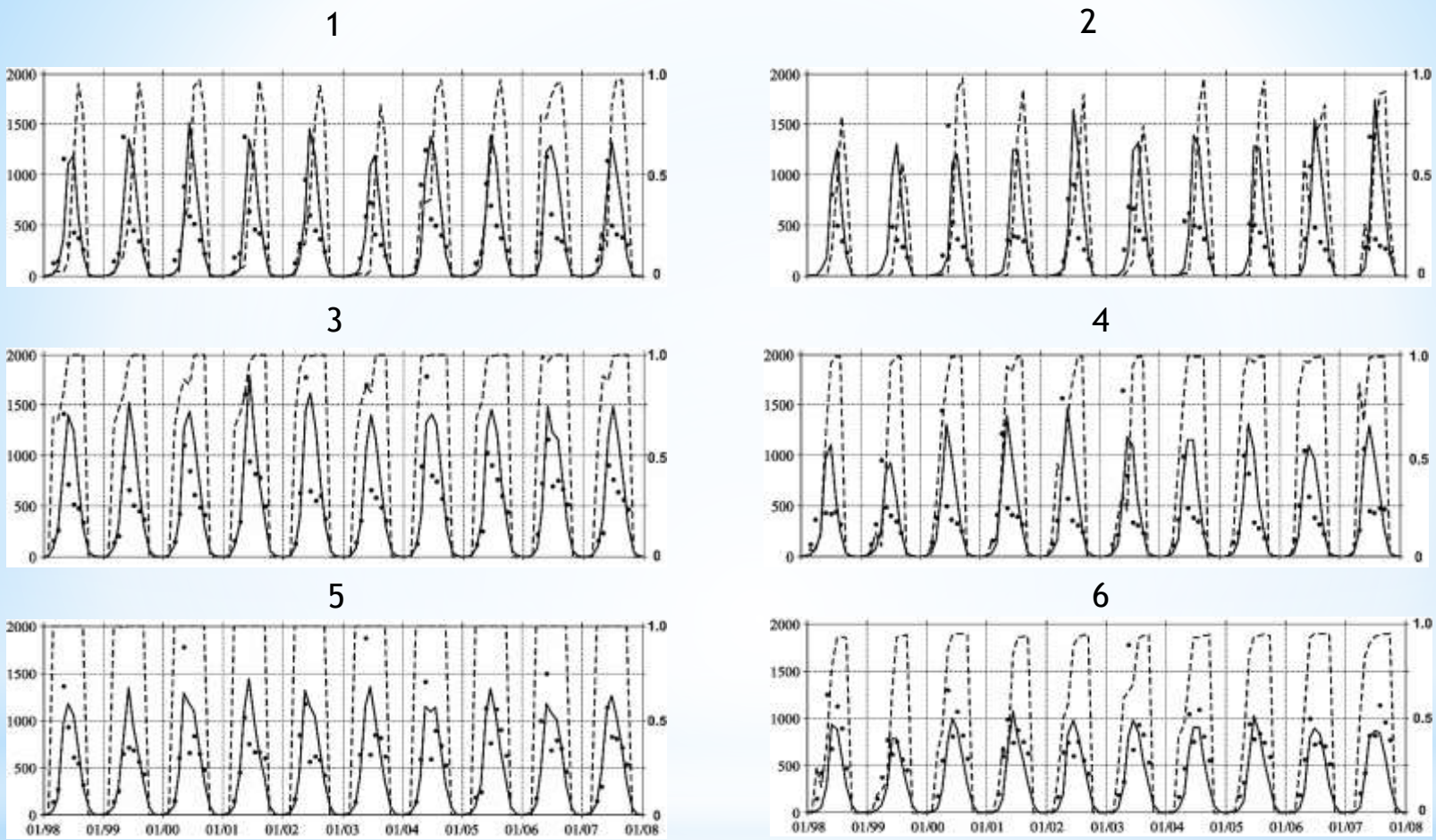
5



6



Monthly average primary production of phytoplankton (mg C m-2 day-1) in 6 different areas of the Barents Sea in 1998-2007.



Comparison of the model results for the period 1998-2007 with satellite data showed that the model reproduces the main features of the seasonal changes in SST, ice extent, surface chlorophyll "a" and primary production in the Barents Sea.

The modeled primary production is consistent with the data better than the modeled chlorophyll "a".