

УДК 581.132:574.583

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ КАРСКОГО МОРЯ ПО ЭКСПЕДИЦИОННЫМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2016 г. А. Б. Демидов¹, С. В. Шеберстов¹, С. В. Вазюля¹,
В. А. Артемьев¹, С. А. Мошаров^{1,2}, А. Н. Храпко¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

e-mail: demspa@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.02.2016 г.

Произведена верификация интегрированной (Ψ-Мод) и разрешающей по глубине (KSDRM) моделей первичной продукции в столбе воды (ИПП) Карского моря по экспедиционным данным (2013–2015 гг.) и данным сканера MODIS-Aqua (2007, 2011, 2013–2015 гг.). При использовании натуральных данных в качестве входящих параметров KSDRM завышает или занижает измеренные значения ИПП осенью приблизительно в 2 раза (средняя квадратическая ошибка регрессии (RMSD) – 0.29), а Ψ-Мод – в 2.5 раза (RMSD = 0.39). Летом эффективность Ψ-Мод снижалась в 1.5 раза (RMSD = 0.57), в то время как KSDRM предсказывала значения ИПП практически с той же точностью (RMSD = 0.31). В море Лаптевых в осенний период KSDRM работала в 1.7 раза эффективнее Ψ-Мод (RMSD 0.24 и 0.41, соответственно). Введение в модели спутниковых данных, полученных с использованием региональных алгоритмов, не привело к снижению предсказывающей способности разработанных моделей. Таким образом, можно рекомендовать интегрированную по глубине модель (Ψ-Мод), как более простую в использовании и достаточно точную, для оценки годовых величин и исследования долговременной изменчивости первичной продукции Карского моря по спутниковым данным.

DOI: 10.7868/S0030157416060010

ВВЕДЕНИЕ

Оценка годовых величин и изучение долговременных изменений интегральной первичной продукции (ИПП) океанов и морей подразумевает разработку моделей и использование спутниковых данных в качестве входящих в эти модели параметров. В дальнейшем, говоря о моделях ИПП, мы будем иметь в виду только эмпирические алгоритмы, основанные на натуральных наблюдениях и использующие в качестве входящих параметров данные, полученные в экспериментах или дистанционном зондировании поверхности океана со спутников, оставляя за рамками настоящей работы биогеохимические, циркуляционные модели. Разработка и верификация алгоритмов ИПП, а также исследование продуктивности арктических морей (АМ) могут быть основаны на так называемых нерегиональном и региональном подходах. При первом из них используются модели, их большинство, созданные без учета специфики формирования первичной продукции (ПП) АМ. Региональный подход подразумевает использование баз экспериментальных данных для АМ и выявление характерных для этого региона зависимостей первичной продукции от абиотических и биотических факторов. Такой подход считается одним из основных путей улучшения моделей ИПП [30].

Эффективность алгоритмов ИПП в АМ невысока [8, 29]. Проблемы, с которыми сталкиваются исследователи при разработке, верификации и применении ИПП моделей в АМ, неоднократно описаны [например, 29]. В основном из-за небольшого количества экспериментальных данных по первичной продукции существует ограниченное число регионально адаптированных для АМ алгоритмов ИПП [12, 23, 24, 31, 41]. Кроме этого, немногочисленные полевые наблюдения часто не позволяют провести так называемую “независимую” верификацию моделей, т.е. тестирование, использующее базу данных, которая не была задействована в разработке модели. Использование “независимых” баз данных для верификации моделей позволяет избежать преждевременных выводов о степени адекватности модели натурным измерениям [11]. Кроме перечисленных проблем моделирования ИПП АМ, следует отметить существенное снижение точности при введении в формулы расчетов спутниковых данных по сравнению с использованием результатов натуральных экспериментов [9, 29].

Карское море относится к водоемам, так называемого второго оптического типа (Case II) [22, 25], в которых применение регионально неадаптированных алгоритмов приводит к низкому соответствию модельных и натуральных данных [29].

Таблица 1. Источники и количество данных, использовавшихся для разработки и верификации моделей первичной продукции Карского моря

| Экспедиция | Время проведения экспедиции | Использование данных | Количество станций с измерениями ИПП | Количество подспутниковых наблюдений | |
|--|--------------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| | | | | первичная продукция | хлорофилл |
| 49-й рейс НИС “Дмитрий Менделеев” | 30 августа–29 сентября 1993 г. | Разработка моделей | 31 | – | – |
| 57-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш” | 9–30 сентября 2007 г. | Разработка моделей | 16 | 3 | 3 |
| 59-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш” | 15 сентября–4 октября 2011 г. | Разработка моделей | 38 | 1 | 3 |
| 125-й рейс НИС “Профессор Штокман” | 3–20 сентября 2013 г. | Верификация моделей | 31 | 7 | 7 |
| 128-й рейс НИС “Профессор Штокман” | 11 августа–7 сентября 2014 г. | Верификация моделей | 51 | 10 | 10 |
| 63-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш” | 30 августа–6 октября 2015 г. | Верификация моделей | 57 | 5 | 3 |

Примечание. ИПП – интегральная первичная продукция.

Поэтому, для таких акваторий разработка и верификация региональных моделей особенно актуальна. Интегрированная и разрешающая по глубине модели ИПП Карского моря были разработаны и верифицированы с использованием экспериментальной базы данных, созданной по материалам четырех экспедиций в Карское море осенью, в конце вегетационного сезона [3]. В результате было показано, что адекватность моделей первичной продукции Карского моря повышается, в основном, при включении в расчеты фотофизиологических параметров (ассимиляционного числа (АЧ), эффективности фотосинтеза), фотосинтетически активной радиации (ФАР). В качестве одного из выводов было продемонстрировано преимущество региональных моделей ИПП Карского моря. Собранные в 2014 г. в 128-м рейсе НИС “Профессор Штокман” и в 2015 г. в 63-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” экспериментальные данные позволяют провести верификацию моделей ИПП на базе расширенного материала для осеннего сезона, а также для летнего сезона, отличного от использованного для разработки моделей. Представляет интерес также исследование возможности применения разработанных для Карского моря моделей в морях Арктики, сходных с ним по гидрофизическим, химическим и биооптическим свойствам, например, в море Лаптевых.

Чтобы использовать разработанные алгоритмы для оценки годовых величин и исследования сезонной и межгодовой изменчивости ИПП АМ, нужно, во-первых, выбрать наиболее эффективно работающую модель; во-вторых проверить возможность ее применения в другие сезоны года и, в-третьих, тестировать эффективность моделей при введении

спутниковых данных в качестве входящих параметров. Поэтому, целями настоящей работы являются: (а) верификация моделей с использованием расширенной “независимой” базы данных для осеннего периода; (б) исследование возможности применения разработанных моделей для летнего периода, а также в море Лаптевых; (в) тестировать эффективность моделей при введении спутниковых данных в качестве входящих параметров.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Источники данных и отбор проб. Источники данных и количество станций, на которых были измерены продукционные параметры фитопланктона, использовавшиеся для разработки и верификации моделей, представлены в табл. 1. Описание районов исследований и местоположение станций приводятся в предыдущих работах [1, 5, 6, 16].

Процедура отбора проб подробно описана ранее [16]. Местоположение станций выбиралось по результатам гидрофизических и гидрооптических съемок, осуществлявшихся с помощью сканирующего мультипараметрического зонда “Idronaut 320 Plus” и проточного флуориметра, разработанного в ИО РАН. Выбор местоположения станций служил целям максимального покрытия экспериментальными точками исследуемой акватории и получения наиболее полных характеристик узких градиентных фронтальных зон. Горизонты отбора проб определялись после предварительного зондирования температуры, электропроводности и флуоресценции STD-зондами Seabird Electronics (SBE 19, SBE 32 и SBE 911).

Для определения содержания хлорофилла “а” (хл “а”) пробы воды отбирали пластиковыми ба-

тометрами комплекса Carousel Water Sampler с 6–9-ти горизонтов верхнего 100-метрового слоя. Проба из поверхностного слоя на этих станциях отбиралась пластиковым ведром одновременно с замыканием батометров у поверхности.

Экспериментальные данные. Методика и схемы постановки опытов по определению ПП подробно описаны ранее [1, 5, 6, 16]. Во всех экспедициях первичную продукцию измеряли при помощи радиоуглеродной модификации скляночного метода [37]. Определение содержания хл “а” проводили при помощи спектрофотометрического [27, 35] или флуориметрического [28] методов. Эти данные были использованы для разработки моделей ИПП.

В 125-м рейсе НИС “Академик Штокман” (табл. 1) величины ПП, были получены в ходе экспериментов в инкубаторе ICES [15]. Меченые $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ пробы инкубировались при искусственном освещении в течение 3–4 ч. Ассимиляционное число было рассчитано для 12-ти световых уровней. Результаты использовались для построения световых кривых фотосинтеза, которые аппроксимировались экспоненциальной функцией [32].

Интенсивность надводной облученности измеряли с помощью пиранометра (49-й рейс НИС “Дмитрий Менделеев”) [1] или с использованием датчика падающей радиации в диапазоне ФАР LI-190SA (LI-COR). В последнем случае результаты измерений автоматически интегрировались в блоке LI-1400 за пятиминутные интервалы (Ein/m^2) в течение дня и сохранялись во внутренней памяти блока. В последующем эти величины использовались для расчета интегральной величины падающей радиации за период экспозиции экспериментальных склянок при определении первичной продукции и за световой день.

Показатель вертикального ослабления облученности (K_d) измеряли с помощью альфамера (49-й рейс НИС “Дмитрий Менделеев”) или рассчитывали для верхнего слоя, нижней границей которого принималась изолюма 10% ФАР, по закону Бугера–Ламберта–Бэра. При втором подходе измерения подводной облученности проводилось при помощи мультисканального спектродиометра (VIC) (125 и 128-й рейсы НИС “Академик Штокман”) или датчика подводной облученности в диапазоне ФАР LI-192SA (LI-COR) (59 и 63-й рейсы НИС “Академик Мстислав Келдыш”). При отсутствии подводных гидрооптических измерений, величины показателя ослабления были рассчитаны по эмпирической зависимости K_d от относительной прозрачности по диску Секки, полученной в августе–сентябре 1993 г. [1, 16], или от концентрации поверхностного хл “а” (X_{L_0}) (данные не опубликованы).

Спутниковые данные. Данные сканера цвета океана MODIS-Aqua L2 уровня, включающие

значения коэффициента яркости моря $R_{rs}(\lambda_i)$ и ФАР (Ein/m^2 в день) получены с сайта NASA www.oceancolor.gsfc.nasa.gov/ и обработаны с помощью программного обеспечения SMCS, разработанного в ИО РАН [36]. Значения $R_{rs}(531)$ и $R_{rs}(547)$ были пересчитаны в величины концентрации X_{L_0} с использованием формулы

$$\ln(X_{\text{L}_0}) = -6.64 \ln(R_{rs}(531)/R_{rs}(547)) - 0.265$$

$$(R^2 = 0.43; N = 69),$$

которая является модифицированным выражением, приведенным ранее при описании регионального алгоритма расчета концентрации хл “а” [4]. Для расчета спектральных значений $K_d(\lambda)$, была использована модификация полуаналитического алгоритма [40]. Данные по фотосинтетически активной радиации использовались как стандартный продукт сканера MODIS-Aqua. Как было отмечено в предыдущих работах, модель ФАР для сканера MODIS-Aqua завышает значения *in situ* [21]. Анализ данных по ФАР для Карского моря также показал систематическое завышения спутниковых величин ФАР (ФАР_{sat}) по сравнению с измеренными ($\text{ФАР}_{\text{и}}$). В среднем отношение $\text{ФАР}_{\text{и}}/\text{ФАР}_{\text{sat}}$ равнялось 0.64 ($N = 30$; $cv = 20\%$). Полученное эмпирическое отношение было использовано в качестве переходного коэффициента при введении ФАР в модели ИПП.

Краткое описание моделей первичной продукции. Формула расчета интегрированной по глубине модели (ИГМ) ИПП Карского моря (Ψ -Мод) в качестве коэффициентов включает величину эффективности утилизации солнечной энергии в столбе воды (ψ) и индекс вертикального распределения хл “а” (k). Параметр ψ представляет отношение среднего для слоя фотосинтеза дневного ассимиляционного числа (ДАЧ_c) и подповерхностной облученности (I_0) ($\psi = \text{ДАЧ}_c/I_0$) [19]. Индекс k рассчитывается как отношение суммарного хл “а” в слое фотосинтеза ($X_{\text{L}_{\text{fc}}}$) и поверхностного хл “а” ($k = X_{\text{L}_{\text{fc}}}/X_{\text{L}_0}$) [13]. Входящими параметрами являются величины содержания X_{L_0} и дневной приходящей ФАР. Эти показатели сравнительно легко определяются в полевых условиях. При таком подходе модельная величина интегральной первичной продукции (ИПП_m) может быть рассчитана, как

$$\text{ИПП}_m = k \times \psi \times X_{\text{L}_0} \times I_0.$$

Коэффициенты ψ и k рассчитывались, как средние для Карского моря. Так как распределение произведения $k \times \psi$ носит ярко выраженный логнормальный характер, целесообразно использование средней геометрической величины (G) [7]. Для данных по всей акватории Карского моря G произведения $k \times \psi$ оказалось равным 8.27. Таким образом,

$$\text{ИПП}_m = 8.27 \times X_{\text{L}_0} \times I_0.$$

Разработка разрешающей по глубине модели (BPM) ИПП Карского моря (KSDRM – Kara Sea depth-resolved model) основана на использовании максимального в столбе воды ассимиляционного числа ($AЧ_M$), и вертикальных кривых АЧ и хл “а” [16]. Значения $AЧ_M$ были получены с использованием эмпирической зависимости этого показателя от I_0 .

$$AЧ_M = 10^{-0.71 + \lg_{10} I_0}$$

Величины АЧ для различных горизонтов ($AЧ_z$) были рассчитаны по степенной зависимости $AЧ_z$ от ФАР [16]. Итоговая формула расчета дневного ассимиляционного числа (ДАЧ_z) для каждого горизонта может быть записана в виде

$$ДАЧ_z = (10^{-0.71 + \lg_{10} I_0}) \times ДСД \times ((11.65 I_z^{0.49}) / 100),$$

где ДСД – длительность светового дня.

Параметризация вертикальных профилей хл “а” для акваторий различного трофического уровня была проведена в предыдущей работе [2], что позволяет рассчитать ИПП отдельно в водах с разным содержанием Хл₀. Входящими в модель параметрами являются Хл₀, I_0 и K_d . Подробное описание результатов разработки ИГМ и BPM по глубине моделей ИПП Карского моря представлено в работе Демидова с соавторами [16].

Верификация моделей. Значения измеренной (ИПП_и) и рассчитанной с помощью моделей (ИПП_м) интегральной первичной продукции логарифмировались для того, чтобы привести их распределение к нормальному и использовать методы параметрической статистики. Связь между ИПП_и и ИПП_м аппроксимировались уравнениями линейной регрессии. Степень связи между ИПП_и и ИПП_м оценивалась по коэффициенту детерминации (R^2). Полученные регрессии сопоставлялись с линией оптимального соответствия (1 : 1). Ошибка линейной регрессии (RMSD) была использована для оценки адекватности моделей. RMSD характеризует степень различия логарифмированных значений ИПП_и и ИПП_м и включает как систематическую, так и случайную погрешности [18, 39].

Ранее lg-нормированные величины RMSD были использованы для оценки адекватности продукционных алгоритмов в ходе сравнений эффективности различных моделей (primary production algorithm round robin (PPARR)) [13, 20, 29, 33, 34]. Модели, имеющие низкую величину RMSD, эффективнее алгоритмов с высоким значением ошибки регрессии. RMSD, близкое к 0.3, свидетельствует о завышении или занижении расчетных значений по сравнению с измеренными величинами приблизительно в 2 раза. Кроме этого, нами были рассчитаны средние величины систематической погрешности (B) для каждой модели, чтобы оценить завышение или занижение ИПП_и. По-

грешности связи экспедиционных и спутниковых данных по содержанию хл “а”, ФАР и K_d оценивались в абсолютных и относительных единицах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты верификации интегрированной по глубине модели (Ψ-Мод). Регрессионная зависимость измеренных и рассчитанных по модели величин ИПП (ИПП_и и ИПП_м, соответственно), полученная по осенним данным (сентябрь–октябрь) показана на рис. 1а, а параметры линейной регрессии представлены в табл. 2. В этом случае данные для разработки и верификации модели были собраны в один и тот же сезон года. Коэффициент детерминации был равен 0.51. Линия регрессии была близка с линией оптимального соответствия (1 : 1) ($a = 0.77$). Различия ИПП_и и ИПП_м составляли 2.5 раза (RMSD = 0.39). Модель в среднем занижала измеренные величины ИПП ($B = -0.19$).

В августе наблюдалось уменьшение эффективности Ψ-Мод (рис. 1в). Коэффициент детерминации снизился в 1.8 раза и оказался равен 0.29. Завышение или занижение модельных величин составляло 3.7 раза (RMSD = 0.57) при средней абсолютной ошибке -0.29 , что свидетельствует об увеличении степени занижения по сравнению с осенним периодом в 1.5 раза (табл. 2).

В море Лаптевых в сентябре наблюдалось снижение эффективности модели и увеличение средней абсолютной ошибки по сравнению с Карским морем (рис. 2а, табл. 2). Коэффициент детерминации уменьшился в 1.7 раза ($R^2 = 0.30$). При этом RMSD и средняя абсолютная погрешность уменьшились незначительно в 1.1 раза (0.41 и -0.21 , соответственно). Также как осенью и летом в Карском море, Ψ-Мод занижала значения ИПП.

Введение в модель спутниковых величин Хл₀ и ФАР привело к увеличению эффективности модели по сравнению с использованием натуральных данных, если критерием считать величину ошибки линейной регрессии. Завышение или занижение расчетных величин составило 2.0 (RMSD = 0.30). Напротив, коэффициент детерминации оказался самым низким из всех видов сопоставления ИПП_и и ИПП_м ($R^2 = 0.22$). Следует отметить, что верификация Ψ-Мод по спутниковым данным также свидетельствует о некотором занижении расчетных величин ИПП ($B = -0.11$) (рис. 2в; табл. 2).

Результаты верификации разрешающей по глубине модели (KSDRM). В осенний период (сентябрь–октябрь) разрешающая по глубине модель ИПП Карского моря при сравнении с использованием натуральных данных работала приблизительно на 20–30% эффективнее, чем Ψ-Мод (рис. 1б). Также как и в случае Ψ-Мод для осенних данных,

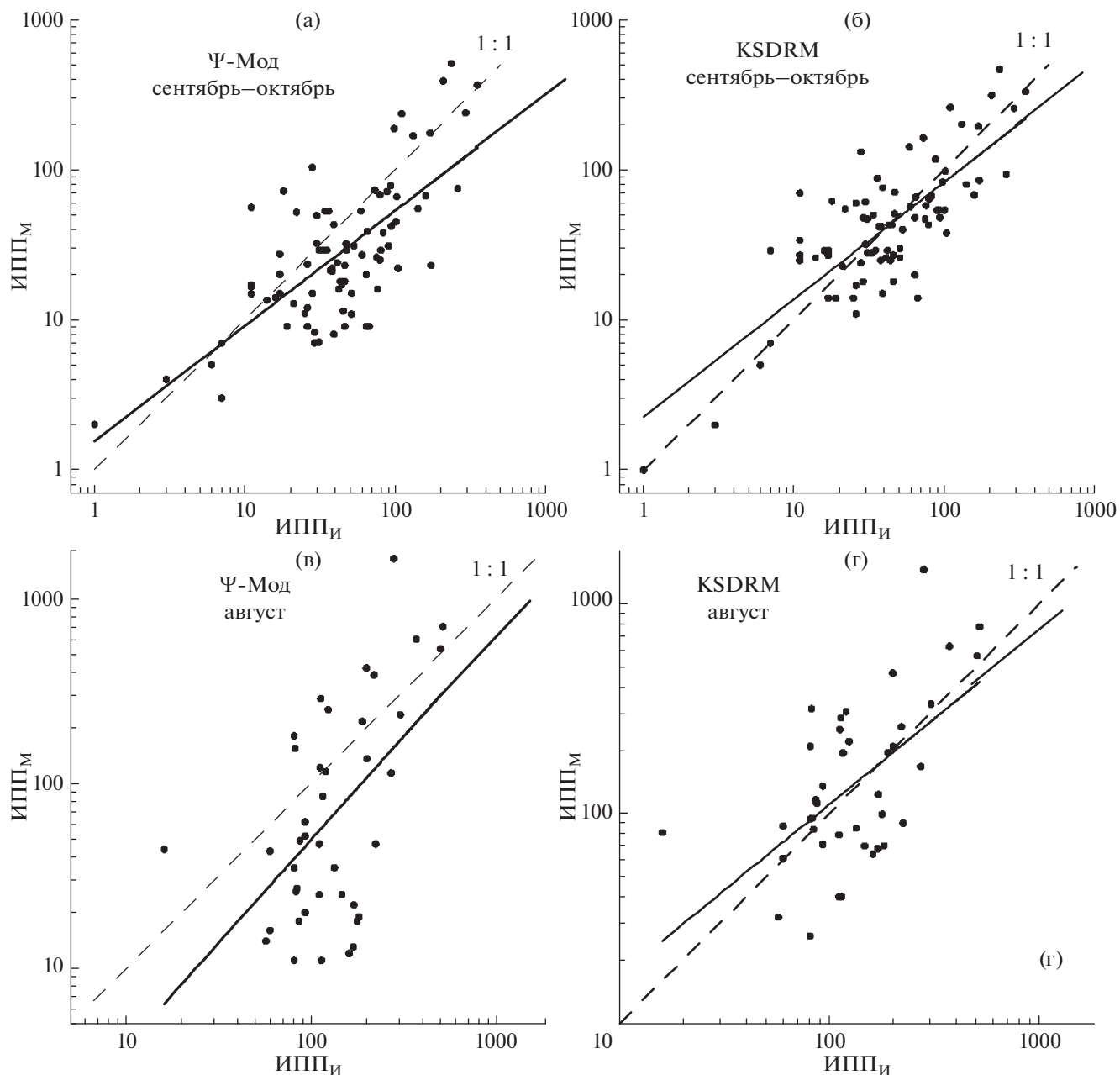


Рис. 1. Регрессионная зависимость измеренных (ИПП_И, мгС/м² в день) и расчетных (ИПП_М, мгС/м² в день) величин первичной продукции в столбе воды, полученных с использованием экспедиционных данных при помощи интегрированной (Ψ-Мод) и разрешающей по глубине (KSDRM) моделей в Карском море в сентябре-октябре (а) и (б) и в августе (в) и (г).

линия регрессии была близка к линии оптимального соответствия ($a = 0.78$). Различие измеренных и расчетных величин составило 1.9 раза (RMSD = 0.29) при максимальном из всех сравниваемых массивов данных коэффициенте детерминации ($R^2 = 0.61$). При этом средняя абсолютная погрешность оказалась незначительной ($B = -0.001$) (табл. 2).

Результаты тестирования степени адекватности KSDRM по летним данным (август) показывают

уменьшение коэффициента детерминации в 1.6 раза ($R^2 = 0.38$) по сравнению с осенними. Наклон линии регрессии уменьшился по сравнению с сентябрем-октябрем ($a = 0.87$) (рис. 1г). Обращает на себя внимание, что ошибка линейной регрессии изменилась незначительно (RMSD = 0.31), средняя абсолютная погрешность указывает на некоторое завышение расчетных величин ИПП ($B = 0.03$) (табл. 2). Также как и в осенний период при использовании для верификации натуральных данных, летом ВРМ оказалась эффективнее ИГМ.

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа связи $\lg y = b + a \lg x$ измеренных (ИПП_и – $\lg x$) и рассчитанных с помощью моделей (ИПП_м – $\lg y$) величин интегральной первичной продукции и показателя эффективности различных моделей

| Модель | Сезон, регион и источник данных | b | a | R^2 | p | RMSD | B | M | σ | N |
|--------|--|-------|------|-------|------|------|--------|------|----------|-----|
| Ψ-Мод | Карское море, сентябрь–октябрь, <i>in situ</i> | 0.19 | 0.77 | 0.51 | 0.00 | 0.39 | –0.19 | 1.44 | 0.47 | 84 |
| | Карское море, август, <i>in situ</i> | –0.53 | 1.11 | 0.29 | 0.00 | 0.57 | –0.29 | 1.82 | 0.58 | 41 |
| | Море Лаптевых, <i>in situ</i> | –1.35 | 1.63 | 0.30 | 0.04 | 0.41 | –0.21 | 1.61 | 0.42 | 14 |
| | MODIS-Aqua | 1.02 | 0.42 | 0.22 | 0.02 | 0.30 | –0.08 | 1.81 | 0.27 | 26 |
| KSDRM | Карское море, сентябрь–октябрь, <i>in situ</i> | 0.35 | 0.78 | 0.61 | 0.00 | 0.29 | –0.001 | 1.62 | 0.43 | 84 |
| | Карское море, август, <i>in situ</i> | 0.30 | 0.87 | 0.38 | 0.00 | 0.31 | 0.03 | 2.14 | 0.39 | 41 |
| | Море Лаптевых, <i>in situ</i> | –0.36 | 1.16 | 0.34 | 0.03 | 0.24 | –0.01 | 1.74 | 0.29 | 14 |
| | MODIS-Aqua | 1.19 | 0.44 | 0.27 | 0.01 | 0.31 | 0.14 | 2.03 | 0.26 | 26 |

Примечание. a и b – коэффициенты в уравнении линейной регрессии; R^2 – коэффициент детерминации; p – доверительный интервал; RMSD – средняя квадратическая ошибка регрессии; B – средняя абсолютная погрешность; M – средняя арифметическая логарифмов величин ИПП_м; σ – стандартное отклонение; N – количество парных измерений.

Таблица 3. Результаты регрессионного анализа $\lg y = b + a \lg x$ и показатели эффективности связи величин интегральной первичной продукции, рассчитанных при помощи интегрированной (Ψ-Мод – $\lg x$) и разрешающей по глубине (KSDRM – $\lg y$) моделей

| Сезон, регион и источник данных | b | a | R^2 | p | RMSD | B | N |
|--|------|------|-------|-------|------|------|-----|
| Сентябрь–октябрь, Карское море, <i>in situ</i> | 0.44 | 0.82 | 0.79 | <0.05 | 0.28 | 0.18 | 84 |
| Август, Карское море, <i>in situ</i> | 1.00 | 0.62 | 0.86 | <0.05 | 0.41 | 0.32 | 41 |
| Сентябрь, море Лаптевых, <i>in situ</i> | 0.68 | 0.65 | 0.94 | <0.05 | 0.20 | 0.13 | 14 |
| MODIS-Aqua | 0.89 | 0.63 | 0.43 | <0.05 | 0.30 | 0.22 | 26 |

Примечание. Условные обозначения см. в примечании к табл. 2.

В море Лаптевых произошло снижение коэффициента детерминации по сравнению с Карским морем в 1.8 ($R^2 = 0.34$). Линия регрессии располагалась ниже линии оптимального соответствия (1 : 1) при незначительном наклоне ($a = 1.16$) (рис. 26). В тоже время различия ИПП_и и ИПП_м оказались самыми небольшими из всей сравниваемых массивов данных (RMSD = 0.24). Средняя абсолютная погрешность была также незначительной ($B = -0.01$), указывая на небольшое занижение модельных величин ИПП (табл. 2). Сравнение эффективности Ψ-Мод и KSDRM в море Лаптевых показывает лучшее соответствие натурным результатам расчетов, полученным с использованием ВРМ модели.

Введение в расчетные формулы спутниковых данных ($X_{л0}$, ФАР и K_d) практически не уменьшили воспроизводимость KSDRM, если в качестве показателя эффективности модели использовать RMSD и проводить сравнение для осеннего периода (табл. 2). Следует отметить, что коэффициент детерминации снизился в 2.3 раза при введении в модель спутниковых данных. Их использование привело к завышению ИПП_м ($B = 0.14$) (табл. 2). Использование спутниковых данных в качестве входящих параметров не привело к существенным различиям KSDRM по сравнению с Ψ-Мод

по основным показателям эффективности (a , RMSD, R^2).

Исследование сходства степени эффективности результатов Ψ-Мод и KSDRM. Разрешающая по глубине модель (KSDRM) завышала ИПП по сравнению с Ψ-Мод в Карском море и море Лаптевых, летом и осенью как по экспедиционным, так и по спутниковым данным (рис. 3). По данным регрессионного анализа и параметрам эффективности при использовании экспедиционных данных степень сходства работы моделей была близкой в осенний период в Карском море и море Лаптевых (табл. 3). Наименьшее сходство было получено для августа в Карском море, когда RMSD увеличился в 2 раза, а средняя абсолютная ошибка – в 2.5 раза. Введение спутниковых данных в качестве входящих параметров снизили степень сходства модельных расчетов в 2 раза по коэффициенту детерминации и практически не изменили ее по RMSD (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многочисленные оценки эффективности ИПП моделей различных типов в глобальном и региональном масштабах позволили сделать вывод о том, что адекватность модельных расчетов не зависит от сложности алгоритма [14, 20, 24, 34].

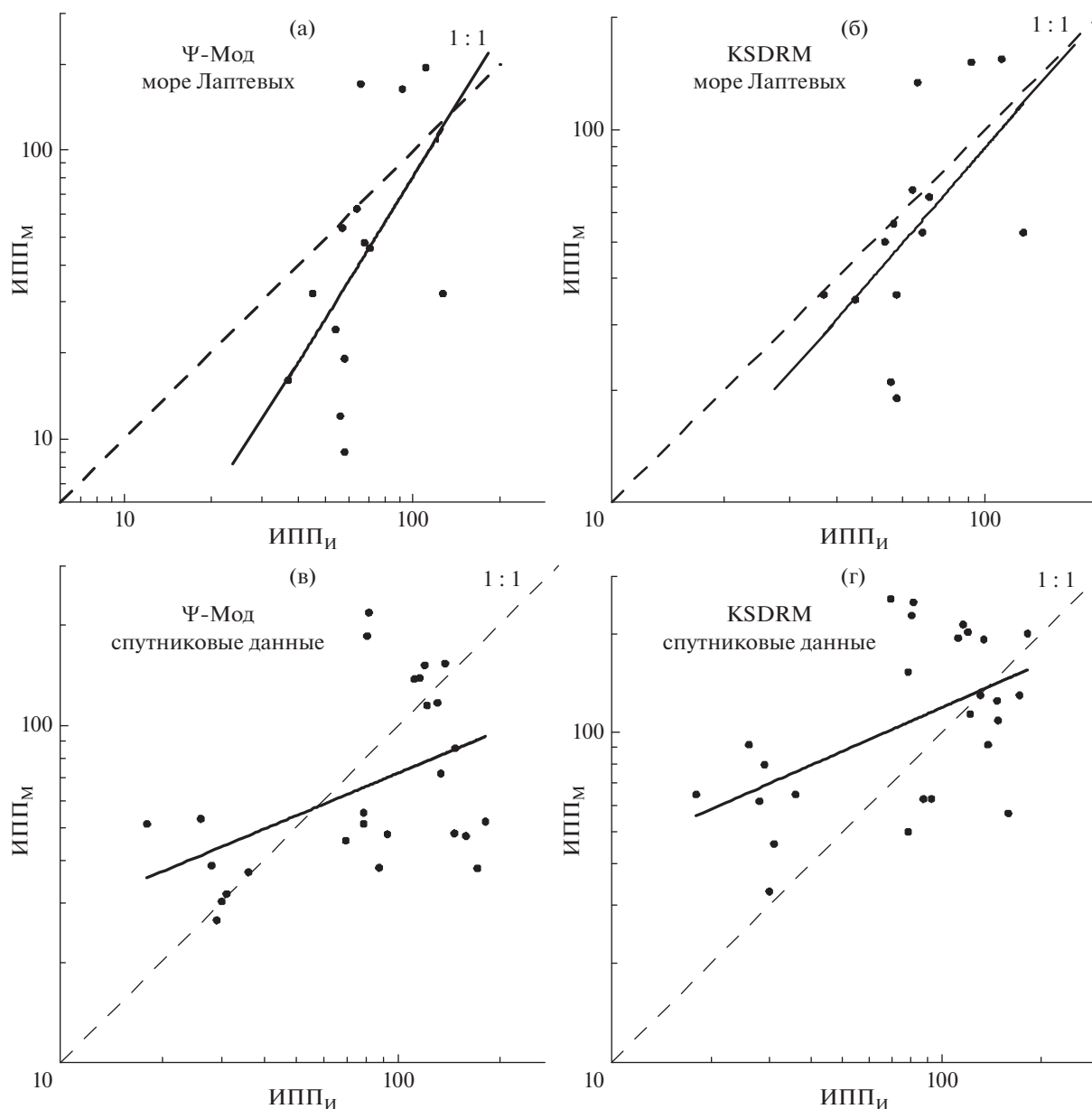


Рис. 2. Регрессионная зависимость измеренных (IПП_И, мгС/м² в день) и расчетных (IПП_М, мгС/м² в день) величин первичной продукции в столбе воды, полученных с использованием экспедиционных данных при помощи интегрированной (Ψ-Мод) и разрешающей по глубине (KSDRM) моделей в море Лаптевых (а) и (б) и спутниковых данных (в) и (г).

С другой стороны, мнения о преимуществе ВРМ над ИГМ расходятся. Так, в ранних работах показано, что использование вертикальных профилей хл “а” не приводит к существенному улучшению моделей [10]. Другими авторами признается, что результаты, полученные при использовании ВРМ, лучше коррелируют с натурными измерениями ИПП, чем данные ИГМ [26, 29].

Сравнение эффективности региональных моделей первичной продукции показало, что при использовании данных *in situ* в качестве входящих параметров IПП_М разрешающей по глубине модели (KSDRM) лучше соответствует натурным

измерениям в Карском море осенью в 1.3 раза, летом в 1.8 раза и в море Лаптевых (сентябрь) в 1.7 раза, чем результаты интегрированной по глубине модели (Ψ-Мод). Интересным результатом исследования стало то, что при введении спутниковых данных по Хл₀, ФАР и К_д эффективность ИГМ и ВРМ практически сравнялась. При этом использование спутниковых данных практически не повлияло на эффективность KSDRM, а степень адекватности Ψ-Мод натурным данным даже возросла в среднем в 1.6 раза.

На рис. 4а видно, что спутниковые значения Хл₀ выше измеренных даже при использовании

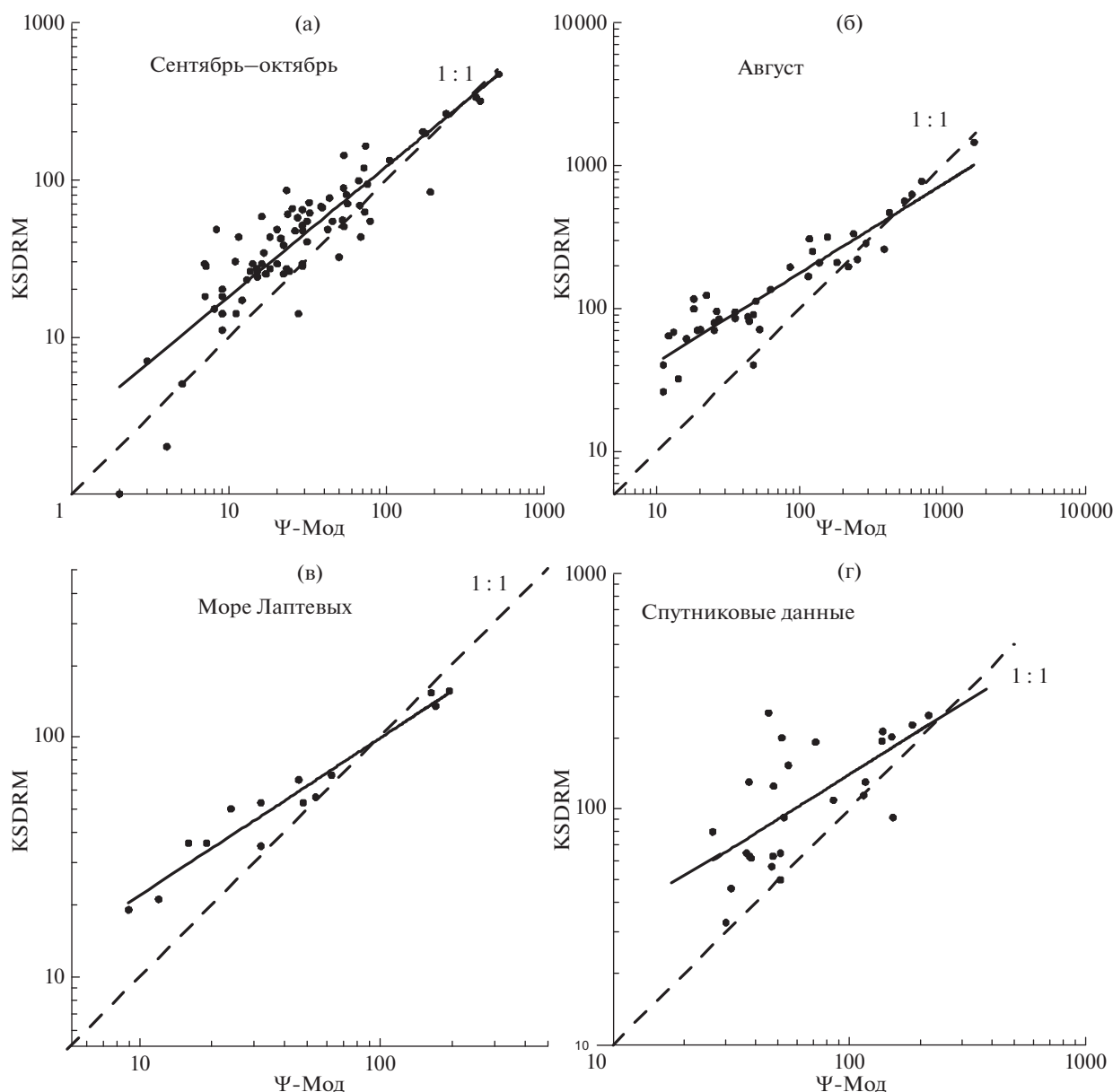


Рис. 3. Сравнение степени сходства расчетов ИПП (mgC/m^2 в день), полученных при помощи интегрированной (Ψ -Мод) и разрешающей по глубине (KSDRM) моделей с использованием экспедиционных данных в Карском море в сентябре–октябре (а), в августе (б), в море Лаптевых (в) и с использованием спутниковых данных (г).

регионально адаптированного алгоритма [4]. Карское море находится под сильным влиянием речного стока, что не позволяет использовать стандартный продукт NASA в оптически сложных Case II водах. Поэтому, полученные с помощью регионального алгоритма расчеты по X_{L_0} являются на сегодняшний день оптимальными. Тем не менее, из использованных в моделях спутниковых параметров, X_{L_0} дает максимальную погрешность по сравнению с Φ_{AP} и K_d (рис. 4, табл. 4). X_L “а” является ключевым входящим в модели параметром, поэтому как можно более точное его воспроизведение с использованием

спутниковой информации является критичным для расчета ИПП [30].

Модели ИПП Карского моря были разработаны по базе данных, собранных в сентябре–октябре [3]. Представляет интерес ответ на вопрос, с какой эффективностью они работают в другие сезоны года и в АМ, сходных с Карским морем по физико-химическим свойствам водного столба. Таким морем может считаться море Лаптевых, также как и Карское море стратифицированное, мелководное, подверженное сильному влиянию речного стока [17, 38]. Результаты регрессионного анализа и показатели эффективности моделей

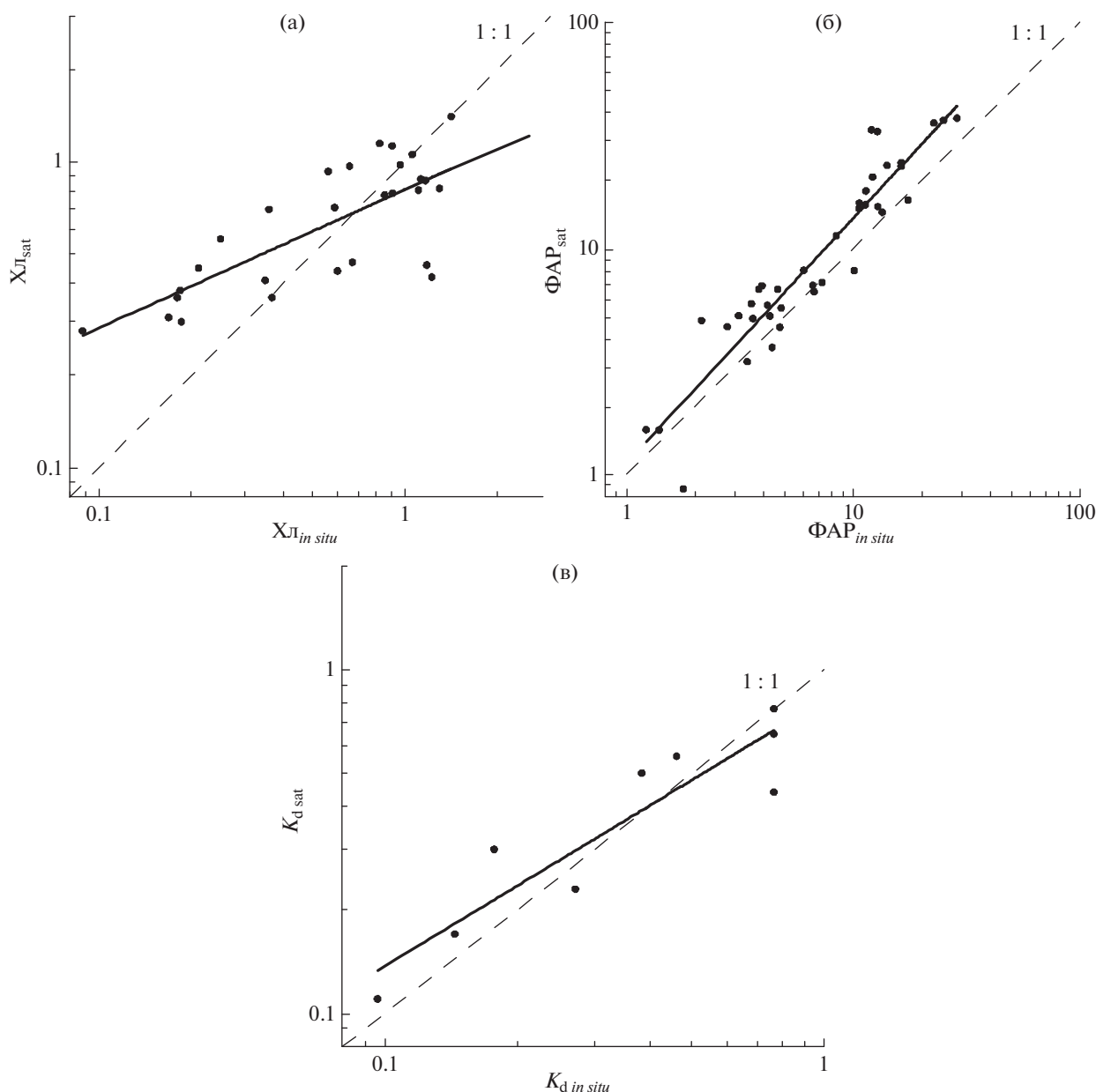


Рис. 4. Сравнение натуральных (*in situ*) величин поверхностного хл “а” ($\text{мг}/\text{м}^3$) – (а), фотосинтетически активной радиации ($\text{Ein}/\text{м}^2$ в день) – (б) и коэффициента диффузного ослабления (м^{-1}) – (в) и данных сканера MODIS-Aqua (sat).

(табл. 2) свидетельствуют, что использование KSDRM с данными *in situ* в качестве входящих параметров дает удовлетворительные результаты в Карском море в летний период и осенью в море Лаптевых, в то время как адекватность Ψ -Мод натурным измерениям снижается в отличный от разработки сезон года и на другой акватории.

Анализ результатов верификации интегрированной и разрешающей по глубине моделей ИПП Карского моря позволяет дать рекомендации для их использования во время экспедиционных исследований, для оценок годовых величин и исследования долговременных изменений первич-

ной продукции по спутниковым данным. В полевых условиях при отсутствии прямых измерений ПП целесообразно использовать разрешающую по глубине модель (KSDRM), как алгоритм, который дает меньшую погрешность при введении в расчетные формулы экспериментальных данных. При этом прямые измерения должны включать определения концентрации хл “а” на поверхности ($X_{л0}$), приходящей дневной ФАР, вертикального профиля подводной облученности для расчета $K_d(\text{ФАР})$ и длительности светового дня. При отсутствии измерений подводной облученности $K_d(\text{ФАР})$ может быть рассчитан по косвенным

Таблица 4. Параметры линейной зависимости $y = b + ax$ и погрешности связи экспедиционных и спутниковых данных

| Показатель | b | a | R^2 | p | $\bar{\Delta}x$ | $\overline{\delta}x$ | N |
|------------------------|-------|------|-------|-------|-----------------|----------------------|-----|
| $X_{l\text{sat}}$ | -0.09 | 0.45 | 0.57 | <0.05 | -0.01 | 28 | 28 |
| ΦAP_{sat} | 0.05 | 1.08 | 0.88 | <0.05 | 3.86 | 38 | 39 |
| $K_{d\text{sat}}$ | -0.09 | 0.77 | 0.85 | <0.05 | -0.01 | 9 | 10 |

Примечание. $X_{l\text{sat}}$ – концентрация хл “а” ($\text{мг}/\text{м}^3$), полученная при помощи регионального алгоритма; ΦAP_{sat} ($\text{Ein}/\text{м}^2$ в день) и $K_{d\text{sat}}$ (м^{-1}) – фотосинтетически активная радиация и коэффициент диффузного ослабления по алгоритму MODIS-Aqua, соответственно; a и b – коэффициенты в уравнении линейной регрессии; R^2 – коэффициент детерминации; p – вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы; $\bar{\Delta}x$ – средняя величина абсолютной погрешности; $\overline{\delta}x$ – средняя величина относительной погрешности, %; N – количество парных измерений.

данным об относительной прозрачности по диску Секки или X_{l0} [3, 16]. Для оценок годовых величин ИПП Карского моря и исследования ее сезонной и межгодовой изменчивости с использованием спутниковых данных следует применять интегрированную по глубине модель (Ψ-Мод), как более простой и достаточно точный алгоритм. Спутниковые данные при таком подходе ограничиваются X_{l0} и дневной ΦAP .

Авторы благодарят GSFC DAAC (Goddard Space Flight Center, Distributed Active Archive Center) NASA за возможность использования спутниковой информации сканера MODIS-Aqua. Авторы благодарят Симакову У.В., Ступникову А.Н., Абызову Г.А., Конюхова И.В. и Воробьеву О.В., обеспечивших данные по хл “а” в экспедициях, Таскаева В.Р. и Мещерского И.Г. за помощь при проведении палубных оптических работ в 63-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00050). Экспедиционные работы выполнены при поддержке РФФ (грант № 14-50-00095, направление “Экосистемы стратегически важных для Российской Федерации морских регионов”). Обработка полевого материала произведена при поддержке РФФ (грант № 14-17-00681). Обработка спутниковых данных выполнена при поддержке РФФ (грант № 14-50-00095, направление: “Взаимодействие физических, биологических и геологических процессов в береговой зоне, прибрежных акваториях и внутренних морях”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведерников В.И., Демидов А.Б., Судьбин А.И. Первичная продукция и хлорофилл в Карском море в сентябре 1993 г. // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 693–703.
2. Демидов А.Б., Мошаров С.А. Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла “а” в Карском море // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 577–591.
3. Демидов А.Б., Мошаров С.А., Артемьев В.А. и др. Интегрированная и разрешающая по глубине модели первичной продукции Карского моря // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 4.
4. Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. и др. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-AQUA // *Исслед. Земли из космоса*. 2013. № 5. С. 21–31.
5. Мошаров С.А. Распределение первичной продукции и хлорофилла “а” в Карском море в сентябре 2007 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 6. С. 933–941.
6. Мошаров С.А., Демидов А.Б., Симакова У.В. Особенности процессов первичного продуцирования в Карском море в конце вегетационного периода // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 1. С. 90–100.
7. Aitchison J., Brown J.A.C. The lognormal distribution // *Economic Journal*. 1957. V. 67. № 268. P. 713–715.
8. Babin M., Bélanger S., Ellingsen I. et al. Estimating of primary production in the Arctic Ocean using ocean colour remote sensing and coupled physical-biological models: Strengths, limitations and how they compare // *Progr. in Oceanogr.* 2015. V. 139. P. 197–220.
9. Balch W., Evans R., Brown J. et al. The remote sensing of ocean primary productivity: use of a new data compilation to test satellite algorithms // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № C2. P. 2279–2293.
10. Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. A consumer’s guide to phytoplankton primary productivity models // *Limnol. and Oceanogr.* 1997. V. 42. № 7. P. 1479–1491.
11. Behrenfeld M.J., Marañon E., Siegel D.A., Hooker S.B. A photoacclimation and nutrient based model of light-saturated photosynthesis for quantifying oceanic primary production // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2002. V. 228. P. 103–117.
12. Bélanger S., Babin M., Tremblay J.-E. Increasing cloudiness in Arctic damps the increase in phytoplankton primary production due to sea ice receding // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. № 6. P. 4087–4101.
13. Campbell J., Antoine D., Armstrong R. et al. Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance // *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. V. 16. № 3. doi: 10.1029/2001GB001444
14. Carr M.-E., Friedrichs M.A.M., Schmelz M. et al. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color // *Deep-Sea Res. II*. 2006. V. 53. № 5–7. P. 741–770.
15. Colijn F., Edler L. Working manual and supporting papers on the use of a standardized incubator-technique in primary production measurements // *Hydro-Bios Apparatebau GmbH*. 2002.
16. Demidov A.B., Mosharov S.A., Makkaveev P.N. Patterns of the Kara Sea primary production in autumn: Biotic and abiotic forcing of subsurface layer // *J. Mar. Sys.* 2014. V. 132. P. 130–149.
17. Dittmar T., Kattner G. The biogeochemistry of the river and shelf ecosystem of the Arctic Ocean: a review // *Mar. Chemistry*. 2003. V. 83. № 3–4. P. 103–120.
18. Doney S.C., Lima I., Moore J.K. et al. Skill metrics for confronting global upper ocean ecosystem-biogeochemis-

- try models against field and remote sensing data // *J. Mar. Sys.* 2009. V. 76. № 1–2. P. 95–112.
19. *Falkowski P.* Light-shade adaptation and assimilation numbers // *J. Plankton Res.* 1981. V. 3. № 2. P. 203–216.
 20. *Friedrichs M.A.M., Carr M.-E., Barber R. et al.* Assessing the uncertainties of model estimates of primary productivity in the tropical Pacific Ocean // *J. Mar. Sys.* 2009. V. 76. № 1–2. P. 113–133.
 21. *Frouin R., McPherson J., Ueyoshi K., Franz B.A.* A time series of photosynthetically available radiation at the ocean surface from SeaWiFS and MODIS data // *Proc. SPIE* 12. <http://dx.doi.org/10.1117/1112.981264>
 22. *Gordon H.G., Morel A.* Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review / Eds. Barber R.T. *et al.* New York: Springer-Verlag, 1983. 114 p.
 23. *Hill V.J., Matrai P.A., Olson E. et al.* Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. *In situ* and remotely sensed estimates // *Progr. in Oceanogr.* 2013. V. 110. P. 107–125.
 24. *Hill V.J., Zimmerman R.C.* Estimates of primary production by remote sensing in the Arctic Ocean: Assessment of accuracy with passive and active sensors // *Deep-Sea Res. I.* 2010. V. 57. № 10. P. 1243–1254.
 25. IOCCG. Ocean Colour Remote Sensing in Polar Seas / Eds. Babin M. *et al.* IOCCG Report Series. 2015. № 16. International Ocean Colour Coordinating Group, Dartmouth, Canada.
 26. *Jacox M.G., Edwards C.A., Kahru M. et al.* The potential for improving remote primary productivity estimates through subsurface chlorophyll and irradiance measurement // *Deep-Sea Res. II.* 2015. V. 112. P. 107–116.
 27. *Jeffrey S.W., Humphrey G.F.* New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Biochemie und Physiologie der Pflanzen.* 1975. V. 167. P. 191–194.
 28. JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study Protocols). Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study Protocols (JGOFS). Core Meas., Manual Guides. 1994. P. 119–122.
 29. *Lee Y.J., Matrai P.A., Friedrichs M.A.M. et al.* An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color/*in situ* chlorophyll-*a* based models // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. doi: 10.1002/2015/JC11018
 30. *Lee Z., Marra J., Perry M.J., Kahru M.* Estimating oceanic primary productivity from ocean color remote sensing: A strategic assessment // *J. Mar. Sys.* 2015. V. 149. P. 50–59.
 31. *Matrai P.A., Olson E., Suttles S. et al.* Synthesis of primary production in the Arctic Ocean: I. Surface waters, 1954–2007 // *Progr. in Oceanogr.* 2013. V. 110. P. 93–106.
 32. *Platt T., Gallegos C.L., Harrison W.G.* Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton // *J. Mar. Res.* 1980. V. 38. P. 687–701.
 33. *Saba V.S., Friedrichs M.A.M., Antoine D. et al.* An evaluation of ocean color model estimates of marine primary productivity in coastal and pelagic regions across the globe // *Biogeosciences.* 2011. V. 8. № 2. P. 489–503.
 34. *Saba V., Marjorie S., Friedrichs M.A.M. et al.* Challenges of modeling depth-integrated marine primary productivity over multiple decades: A case study at BATS and HOT // *Global Biogeochem. Cycles.* 2010. V. 24. № 3. GB3020, doi: 10.1029/2009GB003655
 35. SCOR–UNESCO. Report of SCOR–UNESCO working group 17 on determination of photosynthetic pigments in Sea Water. Monography of Oceanography Methodology. V. 1. UNESCO, Paris, 1966. P. 9–18.
 36. *Sheberstov S.V., Lukyanova E.A.* A system for acquisition, processing, and storage of satellite and field bio-optical data // *Proceedings of IV international conference “Current problems in optics of natural waters”, Nizhny Novgorod.* 2007. P. 179 – 183.
 37. *Steemann Nielsen E.* The use of radioactive carbon (C¹⁴) for measuring organic production in the sea // *J. du Conseil/ Conseil Permanent International pour l’Exploration de la Mer.* 1952. V. 18. P. 117–140.
 38. *Stein R.* Circum Arctic river discharge and its geological record // *Inter. J. Earth Sci.* 2000. V. 89. № 3. P. 447–449.
 39. *Stow C.A., Jolliff J., McGillicuddy Jr. et al.* Skill assessment for coupled biological/physical models of marine systems // *J. Mar. Sys.* 2009. V. 76. № 1–2. P. 4–15.
 40. *Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Artemiev V.A.* Satellite estimation of the coefficients of CDOM absorption and diffuse attenuation in the White and Kara Seas. *Current Problems of Earth Remote Sensing from Space.* 2014. V. 11. P. 31–41.
 41. *Zhai L., Gudmundsson K., Miller P. et al.* Phytoplankton phenology and production around Iceland and Faroes // *Cont. Sh. Res.* 2012. V. 37. P. 15–25.

Verification of the Kara Sea Primary Production Models by Both Field and Satellite Observations

A. B. Demidov, S. V. Sheberstov, S. V. Vazyulya, V. A. Artemiev, S. A. Mosharov, A. N. Khrapko

Verification of depth-integrated (Ψ -Mod) and depth-resolved (KSDRM) Kara Sea primary production (IPP) models was performed using both field (2013–2015) and satellite (MODIS-Aqua) (2007, 2011, 2013–2015) observations. KSDRM and Ψ -Mod over- or underestimate IPP in autumn by a factor of 2 and 2.5 with shipboard data as input variables (root-mean-square-difference was equal to 0.29 and 0.39, respectively). In summer efficiency of Ψ -Mod decreased by a factor of 1.5 (RMSD = 0.57) while predictive capacity of KSDRM remained the same (RMSD = 0.31). In the Laptev Sea in autumn KSDRM performed better than Ψ -Mod (RMSD was equal to 0.24 и 0.41, respectively). There was no sufficient decrease in predictive skill of both algorithms when MODIS-Aqua data were used as input variables. Thereby, Ψ -Mod as a simple and precise algorithm, can be recommended for annual Kara Sea IPP assessment and study of its long-term variability using satellite data.