

УДК 551.464.38 (265.518)

**Оценка первичной продукции Берингова моря  
с использованием нового подхода***К. К. Кивва*

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии  
(ФГУП «ВНИРО», г. Москва)  
e-mail: marecol@vniro.ru

Океанографические съёмки относительно высокого пространственного разрешения, проводимые в Беринговом море в последние несколько лет, позволяют оценить первичную продукцию по убыли биогенных элементов. Настоящая работа предлагает новый подход для оценки общей и чистой первичной продукции на основе осенних или летних профилей биогенных элементов и растворённого кислорода. В 2012 г. в Беринговом море общая (тотальная) первичная продукция (ПП) варьировала в пределах  $50\text{--}250 \text{ г С м}^{-2} \text{ г}^{-1}$ , в то время как чистая (близкая к «новой») ПП составила  $30\text{--}80 \text{ г С м}^{-2} \text{ г}^{-1}$ . Отношение «новой» к общей первичной продукции было в пределах  $0,2\text{--}0,8$ . Полученные результаты хорошо согласуются с предыдущими исследованиями, проведёнными по другим методикам, в связи с чем предложенный подход рекомендуется для использования в дальнейшем, так как он позволяет более точно оценить общую и «новую» ПП по концентрациям биогенных элементов в тех случаях, когда измерения проводятся однократно в конце лета или осенью.

**Ключевые слова:** Берингово море, биопродуктивность, первичная продукция, биогенные элементы.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из важных современных и перспективных районов рыбохозяйственной деятельности Российской Федерации являются моря северотихоокеанского бассейна. Именно поэтому дальневосточные моря России привлекают к себе особое внимание учёных рыбохозяйственной отрасли. Берингово море занимает второе место после Охотского по объёмам добычи Россией ценных морских биоресурсов: минтая, лососей, трески, палтусов и других. Динамика численности этих видов объясняется, в частности, климатическими изменениями, напрямую или косвенно влияющими на

среду обитания или кормовую базу того или иного вида [Булатов, 2004; Родионов, Кровнин, 1991; Khen et al., 2013; Stabeno et al., 2010; Stepanenko et al., 2007]. Берингово море представляет собой один из примеров субарктических экосистем, которые в целом весьма чувствительны к изменениям климата. Таким образом, изучение факторов, определяющих формирование и динамику биологической продуктивности Берингова моря, становится актуальной прикладной и фундаментальной научной задачей.

Существует ряд относительно недавних оценок и прямых измерений первичной продук-

ции в водах западной части Берингова моря, являющейся исключительной экономической зоной Российской Федерации. Однако все они имеют определённые недостатки, которые рассмотрены ниже. Данная работа представляет промежуточный результат продолжающегося проекта по исследованию динамики продуктивности региона. Целью работы является усовершенствование методики Н. В. Аржановой с коллегами [1995] оценки ПП по изменению концентраций основных биогенных элементов и расчёт «новой» первичной продукции для указанной акватории за 2012 г.

**Научная основа.** Понятие биологической продуктивности тесно связано с понятием первичной продукции (ПП), или продукции сообщества автотрофных организмов, которые способны ассимилировать  $\text{CO}_2$  и минеральные питательные соли, формируя из них органическое вещество (ОВ). Это первичное ОВ становится основой пищевой цепи всей гетеротрофной части экосистемы. В океанологии биопродуктивность морских экосистем оценивается через биологическую нетто- (первичную чистую) и брутто- (первичную общую, или тотальную) продукцию (НПП и ОПП соответственно). ОПП определяется как фотосинтез без учёта изменений концентраций элементов, связанных с дыханием автотрофных водорослей и гетеротрофных организмов. НПП — это ОПП минус расход элементов при дыхании микроводорослей и мелких гетеротрофных организмов. Также выделяется понятие нетто — (чистой) продукции сообщества (НСП), под которым подразумевается ОПП минус расход веществ на дыхание сообщества всех организмов системы в целом. НСП, по сути, служит балансовой характеристикой, отражающей взаимные изменения концентраций ОВ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и питательных солей в некотором объёме воды и соответствует количеству ОВ, переходящему на более высокие трофические уровни. Для любой системы справедливо неравенство  $\text{ОПП} \geq \text{НПП} \geq \text{НСП}$  [Codispoti et al., 2013].

Все вышеперечисленные формы ПП обычно даются в единицах массы первичного ОВ на единицу площади за определённый интервал времени. В морской среде формирование первичного ОВ осуществляется в основном фитопланктоном. Причём потребление минераль-

ных питательных солей и продуцирование ОВ в среднем протекает в соответствии с молярным стехиометрическим соотношением Редфилда-Ричардса  $\text{C}:\text{Si}:\text{N}:\text{P} = 106:23:16:1$  [Redfield, 1958; Richards, 1958; Аржанова и др., 1995]. То есть для формирования одной осреднённой молекулы органического вещества фитопланктон затрачивает 106 атомов углерода, 23 атома кремния, 16 атомов азота и 1 атом фосфора. Многие органические молекулы также включают в себя и другие химические элементы: S, Fe, Cu, Zn и др., которые так же, как и Si, N и P, являются биогенными. Выделение кремния, азота и фосфора из их ряда обусловлено тем, что именно эти элементы содержатся в морской воде в микроколичествах, а потребность автотрофных организмов в них высока. Таким образом, Si, N или P в большинстве случаев потенциально или фактически лимитируют синтез первичного ОВ, поэтому их называют основными биогенными элементами. Углерод необходим для формирования любых органических соединений, и поэтому при оценке ПП используют весовые единицы углерода, поскольку это позволяет количественно оценивать потоки вещества при протекании продукционно-деструкционных процессов. В представленной работе в качестве единиц измерения ПП используются  $\text{г С м}^{-2}$  за сезон (начало активной вегетации — момент измерения), что в первом приближении соответствует  $\text{г С м}^{-2} \text{ г}^{-1}$ , так как оценки ПП проводились по концентрациям биогенных элементов в конце вегетационного периода непосредственно перед началом зимнего конвективного перемешивания.

В соответствии с концепцией «новой» и «регенерированной» продукции [Dugdale, Goering, 1967], часть продукции формируется за счёт изначального зимнего запаса минеральных солей, а общая продукция включает в себя «новую» и «регенерированную», или продукцию на рециклинге основных биогенных элементов, которые образуются при разложении ОВ. То есть,  $\text{ПП} = \text{«новая»} + \text{«регенерированная»}$  ПП, при этом в общем случае  $\text{НСП} \approx \text{«новой» ПП}$  [Codispoti et al., 2013].

Существует ряд методов, позволяющих напрямую измерить ПП фитопланктона. Основными из них и широко применяемыми яв-

ляются скляночный кислородный и углеродный методы. Их использование даже в упрощённом варианте с большим количеством допущений требует специального оборудования и часто связано с существенными затратами судового времени. Кроме того, они трудоёмки и дают представление о темпах ОПП и НПП лишь в пределах локальных акваторий и коротких интервалов времени. Примером таких измерений в исследуемой акватории служат работы Ю. И. Сорокина [1995] и И. А. Налетовой и В. В. Сапожникова [1995], основанные на данных комплексной съёмки 1992 г. К сожалению, такие исследования пока больше не повторялись.

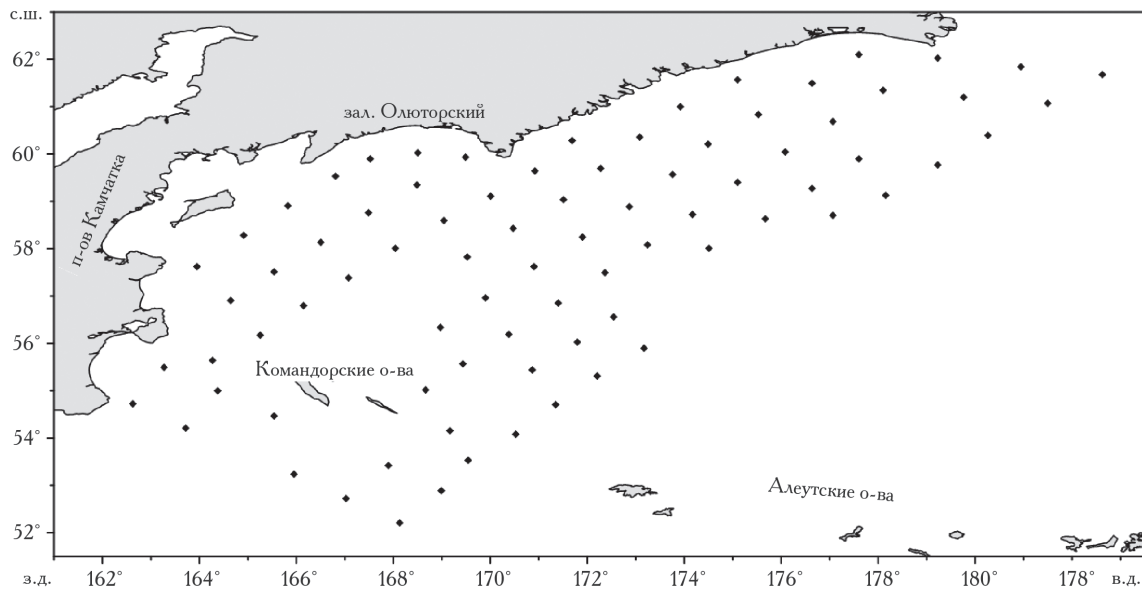
В недавнее время широкое распространение получили модельные методы оценки ПП, основанные на использовании спутниковой информации по поверхностной температуре, хлорофиллу «а» и освещённости. Главным достоинством этого класса методов является охват всей акватории с высоким пространственным и временным разрешением. Основным недостатком такого подхода считается невозможность прямого учёта вклада подповерхностного максимума хлорофилла в ПП. Примерами применения этого подхода к оценке ПП Берингова моря служат работы Э. Брауна с коллегами [Brown et al., 2011; Brown, Arrigo, 2012]. В них предполагается, что пренебрежение подповерхностным максимумом хлорофилла вносит ошибку не более 10%. Это утверждение основано на расчётах ПП для Северного Ледовитого океана С. Паби с соавторами [Pabi et al., 2008]. Однако позднее было показано, что в пределах арктических экосистем учёт подповерхностной ПП может увеличить общую интегральную ПП на 40–75% [Hill et al., 2013]. Вероятно, это справедливо и для Берингова моря. Таким образом, результаты спутниковых оценок ПП для Берингова моря можно рассматривать с точки зрения качественного распределения ПП, но абсолютные величины могут быть сильно занижены. Кроме того необходимо принимать во внимание, что этот класс методов позволяет получить лишь величины ОПП.

Одним из наиболее точных методов оценки НСП за длительный интервал времени (от нескольких дней до недель) является ме-

тод учёта изменения концентраций биогенных элементов в пределах продукционного слоя. Убывание того или иного биогенного соединения в большинстве случаев отражает его потребление автотрофными организмами, а количество потреблённого кремния, азота или фосфора может быть пересчитано в количество произведенного ОВ. К основным источникам погрешностей данного метода относятся следующие: 1) локальные отличия истинной стехиометрии формирования ПП от теоретической, 2) адвекция вод с другим биогенным составом и 3) рециклинг биогенных элементов в пределах расчётного слоя. Отличие потребления биогенных веществ от теоретической схемы связано с составом сообщества автотрофных организмов. Если для азота и фосфора стехиометрические соотношения обычно изменяются в пределах  $\approx 20\%$ , то для кремния коэффициент может меняться в несколько раз в зависимости от состава сообщества автотрофных организмов [Аржанова и др., 1995]. Для природных популяций диатомового планктона, например, были получены молярные соотношения  $C:Si:N:P = 83:35,5:9:1$  [Виноградов, 1939] и  $C:Si:N:P = 92,6:36,9:14,9:1$  [Sverdrup, 1953]. С учётом всех погрешностей этот подход предпочтителен для рыбохозяйственных исследований, так как позволяет оценить количество вещества, доступного для перехода на более высокие трофические уровни [Аржанова и др., 1995; Codispoti et al., 2013]. Кроме того, он весьма удобен с той точки зрения, что требует лишь данные о вертикальном распределении основных гидрологических и гидрохимических параметров, определение которых, в отличие от специальных измерений, на регулярной основе выполняется во многих океанологических и комплексных экспедициях.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для расчётов НСП в западной части Берингова моря в представленной работе использовались данные, полученные в ходе комплексной лососёвой съёмки в 49-м рейсе НИС «Профессор Кагановский» в сентябре 2012 г. (рис. 1). На указанной акватории осенне-зимнее конвективное перемешивание за счёт выхолаживания поверхности начинается в октябре-ноябре. Таким образом, сен-



**Рис. 1.** Схема расположения станций отбора проб в западной части Берингова моря в сентябре 2012 г.

тябрьские данные отражают ситуацию непосредственно перед началом перемешивания и позволяют делать выводы о потреблении биогенных веществ за весь предшествующий вегетационный период.

Профили температуры, солёности и гидрохимических параметров были получены с помощью зондирующего комплекса, оснащённого STD-зондом SBE 9 plus Sealogger и кассетой батометров системы Нискина ёмкостью 1,8 л. Исследования включали измерение концентраций растворённого кислорода и всех минеральных форм основных биогенных элементов (кремния силикатов, фосфора фосфатов, азота нитритов и нитратов, аммонийного азота). Отбор проб производился на горизонтах 0, 30, 40, 100–180, 200–300, 300–400 м. При этом горизонты отбора 30 и 40 м ставились в соответствие с глубиной залегания верхней и нижней границы сезонного термоклина, горизонт 100–180 м — в соответствие с ядром холодного промежуточного слоя (ХПС), горизонты 200–300 и 300–400 м — в соответствие с верхней и нижней границами основного термоклина. Таким образом, горизонты отбора проб выбирались в зависимости от особенностей вертикальных профилей гидрологических параметров. Это позволило при ограниченной ёмкости кассеты батометров отобрать пробы на всех характерных структурных границах вертикальных

профилей и тем самым максимально точно воспроизвести вертикальное распределение кислорода и биогенных элементов. Морская вода для анализа на биогенные элементы отбиралась в полиэтиленовые бутылки ёмкостью 0,5 л, для определения кислорода — в кислородные склянки. Пробы хранились в тёмном месте. Определение соответствующих показателей в них проводилось в течение 12 часов после отбора. Гидрохимические анализы проводились по стандартным методикам, рекомендованным для исследований рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана [Руководство..., 2003].

Величина НСП оценивалась по изменению содержания минеральных форм биогенных элементов в продукционном слое. В данной работе под продукционным слоем понимается слой убыли биогенных элементов по отношению к их зимнему запасу. Поскольку с момента начала активной вегетации фитопланктона до момента измерений прошло 4–6 месяцев, этот слой имел большую мощность, чем верхний квазигомогенный слой (ВКС), в пределах которого протекает активное продуцирование первичного органического вещества. Этот слой оказался размыт вследствие процессов вертикального обмена веществом (диффузионного, турбулентного и адвективного), протекавших длительное время.

Зимнее распределение биогенных веществ, предшествующее весеннему цветению фитопланктона, можно восстановить, используя их концентрации на нижней границе ХПС. Зимой протекает конвективное перемешивание, определяющее однородность всего деятельного слоя до начала весеннего прогрева, и ХПС, наблюдаемый летом и осенью, является следом этого перемешивания. Однако за время вегетационного сезона в ХПС поступает большое количество взвешенного органического вещества, которое при оседании в нижележащие слои постепенно разлагается, увеличивая концентрации всех минеральных питательных солей. Чтобы учесть влияние этого процесса, за зимние концентрации принимались так называемые преформы силикатов, общего минерального азота и фосфатов на нижней границе ХПС. Преформы — это предполагаемые концентрации биогенных элементов в момент потери водной массой возможности обмениваться кислородом с воздухом атмосферы. Они рассчитываются из дефицита кислорода и измеренных концентраций по формуле:

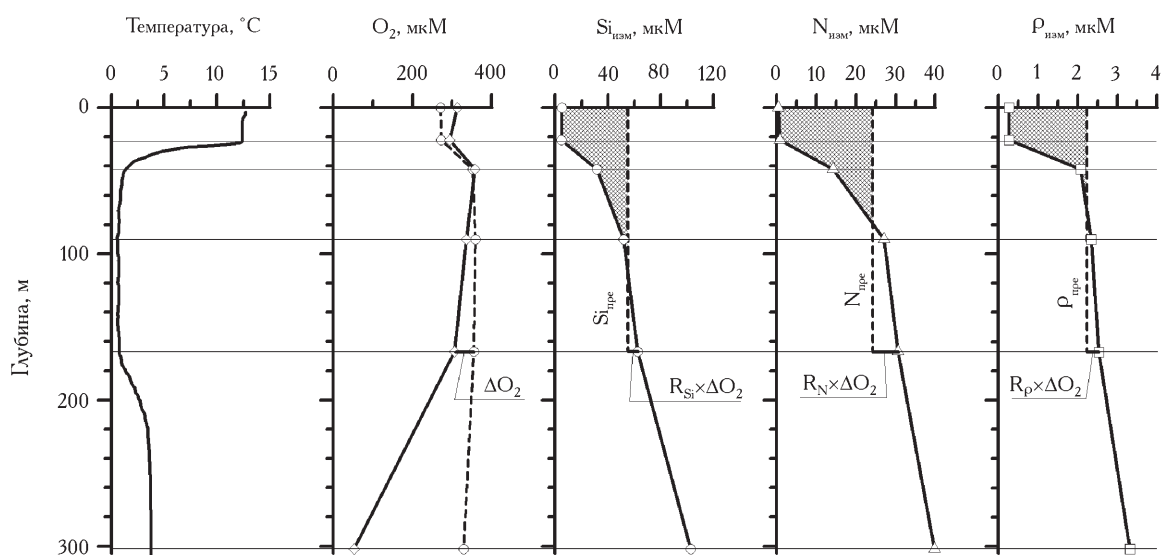
$$X_{\text{пре}} = X_{\text{изм}} - R_x \times \Delta O_2, \quad (1)$$

где  $X_{\text{пре}}$  — преформ-концентрация вещества;  $X_{\text{изм}}$  — его измеренная концентрация;  $R_x$  — коэффициент, вычисляемый из стехиометрического соотношения Редфилда-Ричардса и равный 0,1667, 0,1159 или 0,0072 для кремния силикатов, общего минерального азота или фосфора фосфатов соответственно;  $\Delta O_2$  — дефицит кислорода. Такой расчёт позволяет учесть реминерализованную часть измеренной концентрации.

Величина НСП вычислялась по формуле:

$$\text{НСП}_x = (I[X_{\text{пре}}] - I[X_{\text{изм}}]) \times K_x, \quad (2)$$

где  $\text{НСП}_x$  — чистая продукция сообщества, рассчитанная по кремнию силикатов, общему минеральному азоту или фосфору фосфатов;  $X_{\text{пре}}$  — преформ-концентрация данного элемента;  $X_{\text{изм}}$  — измеренная в конце вегетационного периода концентрация данного элемента;  $K_x$  — коэффициент, получаемый из стехиометрического соотношения и равный 0,055, 0,080 или 1,272 для кремния силикатов, общего минерального азота и фосфора фосфатов соответственно. Интеграция концентраций производилась от поверхности до нижней границы продукционного слоя, то есть до горизонта, где  $X_{\text{изм}} = X_{\text{пре}}$ .



**Рис. 2.** Вертикальные профили температуры, растворённого кислорода, растворимости кислорода при данной температуре и солёности, кремния силикатов ( $Si_{\text{изм}}$ ), общего минерального азота ( $N_{\text{изм}}$ ) и фосфора фосфатов ( $P_{\text{изм}}$ ) на станции 263. Горизонтальными линиями отмечены уровни отбора проб, пунктирные вертикальные линии показывают преформ-концентрации, то есть предполагаемые зимние концентрации  $Si_{\text{пре}}$ ,  $N_{\text{пре}}$  и  $P_{\text{пре}}$ .

Заштрихованные области отвечают потреблённому фитопланктоном количеству биогенного элемента

На рисунке 2 на примере станции 263, выполненной в начале сентября 2012 г. в Камчатском проливе, показана схема расчёта. Хорошо видны элементы гидрологической структуры: ВКС (0–22 м), сезонный термоклин (22–40 м), ХПС (40–170 м), основной термоклин (170–220 м) и верхняя часть тёплого промежуточного слоя (ТПС). Горизонты отбора проб, отмеченные горизонтальными линиями, располагаются вблизи перегибов профиля температуры. Подобным же образом пробы отбирались и на других станциях. В соответствии с нижней границей ХПС на данной станции поставлен горизонт 167 м. Для этого горизонта и был вычислен дефицит кислорода, реминерализованная часть и преформ-концентрации минеральных питательных солей. Заштрихованные области показывают убыль кремния силикатов, общего минерального азота и фосфора фосфатов за вегетационный сезон, то есть потреблённое количество элемента, из которого рассчитывается НСП.

Предлагаемый метод в целом является усовершенствованием метода Н. В. Аржановой с коллегами [Аржанова и др., 1995]. Существенным преимуществом используемого здесь подхода является то, что с его помощью можно проводить расчёты НСП, опираясь на данные, полученные в любой момент вегетационного периода, а не только в весенние месяцы, когда регенерация биогенных элементов ещё не влияет на их концентрации в ХПС [Аржанова и др., 1995]. Это достигается за счёт использования дефицита кислорода для вычисления реминерализованной части и преформ-концентрации каждого биогенного элемента на нижней границе ХПС.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

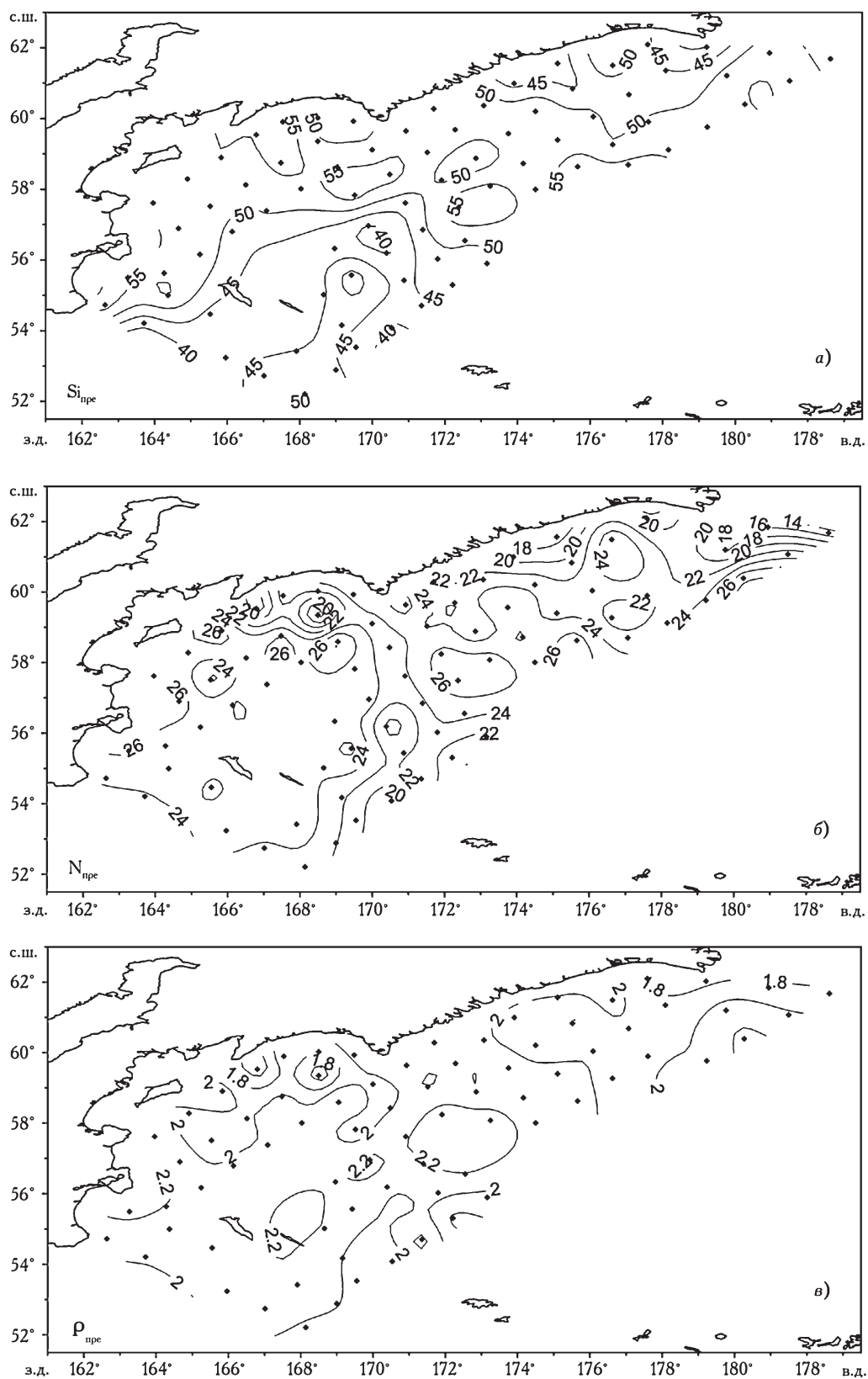
Распределения зимнего запаса силикатов, общего минерального азота и фосфатов демонстрировали существенные различия (рис. 3), связанные с особенностями циклов кремния, азота и фосфора в морских системах. Полоса относительно высоких зимних концентраций кремния силикатов пересекала море в субширотном направлении. Область наименьших концентраций располагалась в южной части исследованной акватории в районе пролива Ближнего. Рассчитанные зимние концентрации

кремния силикатов составили от 39 до 58 мкМ при среднем значении 50 мкМ. Распределения общего минерального азота и фосфора фосфатов показали большую разнородность. Высокие зимние концентрации азота и фосфора наблюдались в западной и центральной части района исследований. Низкие концентрации этих элементов были обнаружены в проливе Ближнем, к югу от Олюторского залива и в районе мыса Наварина. При этом расположение локальных максимумов и минимумов обычно не совпадало. Разброс значений расчётных зимних концентраций азота и фосфора составил, соответственно, 15,3–27,7 и 1,5–2,3 мкМ при средних значениях 23,3 и 2,0 мкМ.

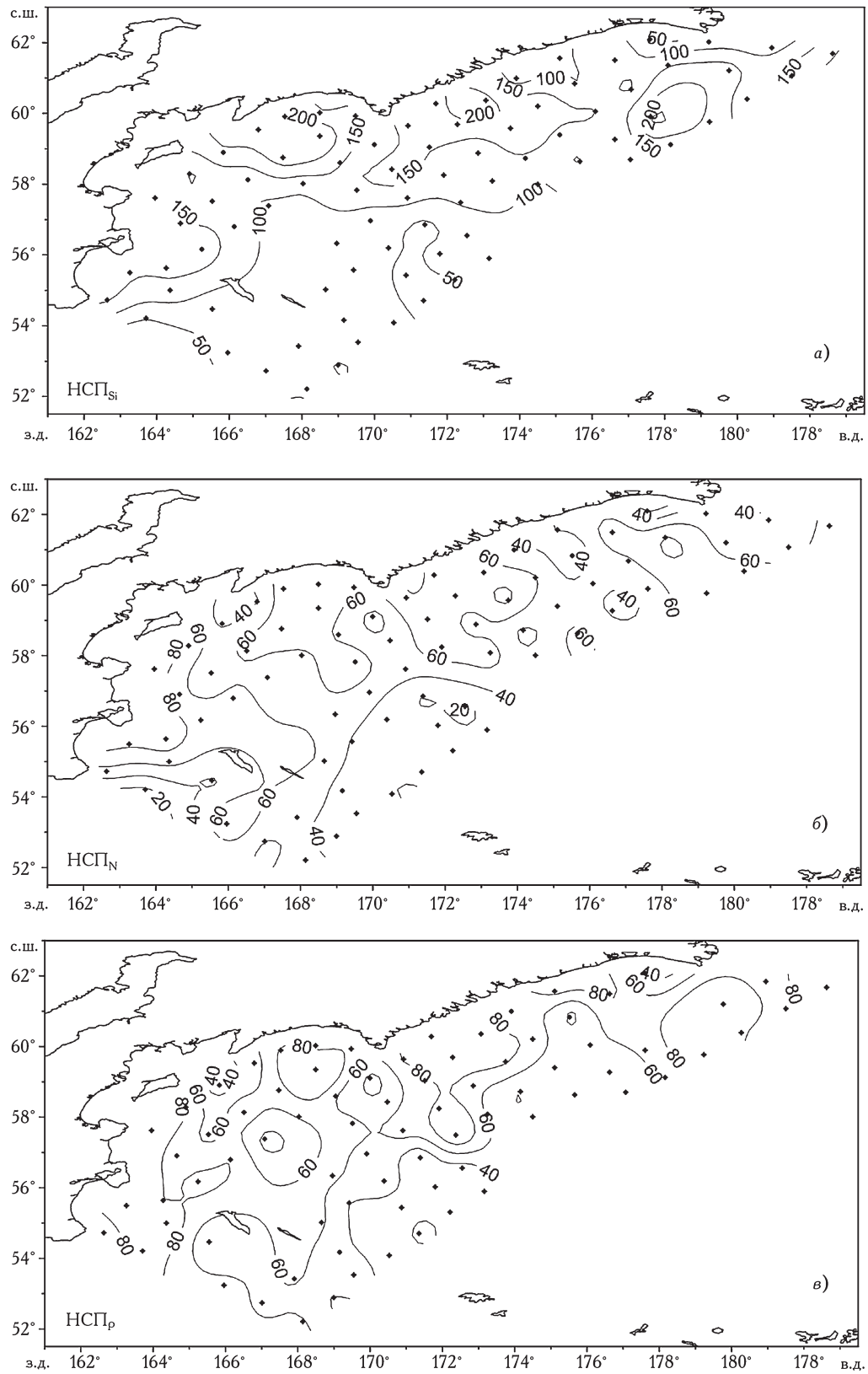
В отличие от картины распределения зимнего запаса минеральных форм биогенных элементов, распределения значений НСП, полученных по вертикальным профилям кремния, азота и фосфора ( $\text{НСП}_{\text{Si}}$ ,  $\text{НСП}_{\text{N}}$  и  $\text{НСП}_{\text{P}}$  соответственно), несмотря на различия в абсолютных значениях, имели схожие черты (рис. 4). Максимальные величины этих параметров были сосредоточены в четырёх регионах: в Камчатском проливе и на запад и север от него, в Олюторском заливе и на юг от него, к востоку от м. Олюторского вдоль Корякского побережья, а также за свалом глубин к югу от мыса Наварина. Данный факт свидетельствует о правомерности предлагаемого метода оценки НСП и показывает, что даже при существовании неточностей в расчётных параметрах общая картина распределения НСП воспроизводится корректно.

В соответствии с подходом Н. В. Аржановой с коллегами [1995], НСП, вычисленная по кремнию ( $\text{НСП}_{\text{Si}}$ ), отражает полную продукцию, в то время как расчёт по азоту ( $\text{НСП}_{\text{N}}$ ) даёт величину «новой» продукции. В данной работе используются те же определения.

Полная продукция ( $\approx \text{ОПП}$ ) в 2012 г. составляла от 38 до 259 г С м<sup>-2</sup> г<sup>-1</sup>, при этом характерными значениями были 70–180 г С м<sup>-2</sup> г<sup>-1</sup>, а среднее — около 140 г С м<sup>-2</sup> г<sup>-1</sup>. «Новая» продукция находилась в пределах 16–102 г С м<sup>-2</sup> г<sup>-1</sup>, при характерных значениях 30–70 г С м<sup>-2</sup> г<sup>-1</sup> и среднем 53 г С м<sup>-2</sup> г<sup>-1</sup>. «Новая» продукция составляла 14–94% от общей, в среднем 46%. (рис. 5).



**Рис. 3.** Распределение расчётных значений зимнего запаса: а) кремния силикатов, б) общего минерального азота и в) фосфора фосфатов ( $Si_{пре}$ ,  $N_{пре}$  и  $P_{пре}$  соответственно), мкМ



**Рис. 4.** Распределение значений НСП, рассчитанных по кремнию (а), общему минеральному азоту (б) и фосфору (в) (НСП<sub>Si</sub>, НСП<sub>N</sub> и НСП<sub>P</sub> соответственно),  $\text{г С м}^{-2} \text{г}^{-1}$

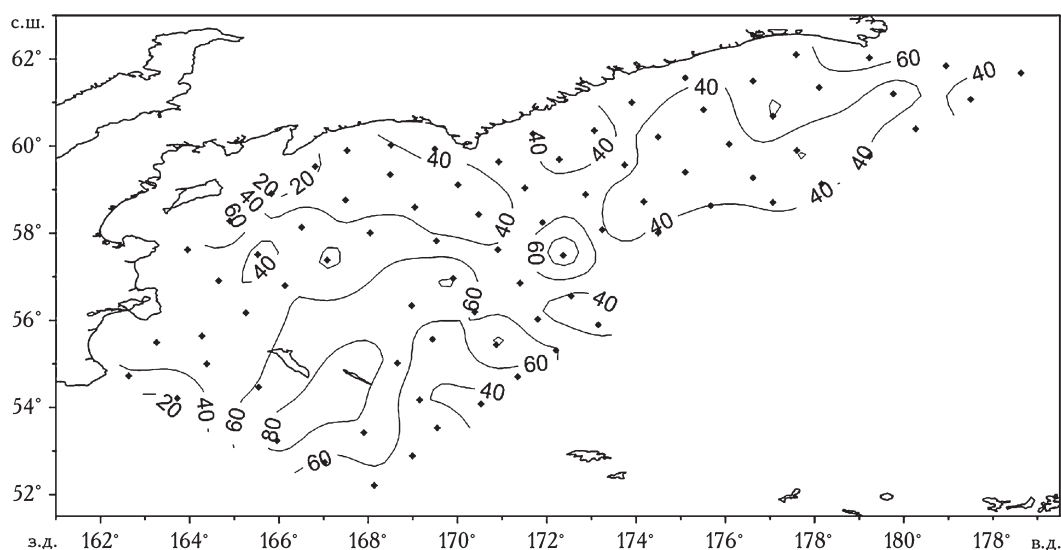


Рис. 5. Доля «новой» продукции в общей продукции фитопланктона, %

В целом областям высокой продуктивности соответствовали области с меньшей долей «новой» продукции в общей продукции фитопланктона, то есть там процессы регенерации биогенных элементов в пределах продукционного слоя на протяжении вегетационного периода протекали более интенсивно.

На рисунке 6 представлены P-N, Si-P и Si-N диаграммы предполагаемых зимних концентраций данных элементов, иллюстрирующие недостаток азота и по отношению к фосфору, и по отношению к кремнию уже в начале весны. То есть эти результаты подтверждают вывод о лимитировании ПП Берингова моря азотом и о ключевой роли этого элемента

в формировании «новой» продукции [Аржанова и др., 1995].

В морских экосистемах кремний потребляется в основном диатомовыми микроводорослями, формирующими из него панцири и створки своих клеток. Они обычно имеют большие размеры, развиваются в больших количествах при избытке питательных солей. Отмирая, они формируют детрит крупной фракции, который быстро погружается в глубокие слои. Кроме того, ассимилированный ими кремний, находящийся в панцирях или створках клеток, реминерализуется медленно и большая его часть выводится из продукционного слоя [Kamatami, 1982]. В сообществе фитопланктона Берингова

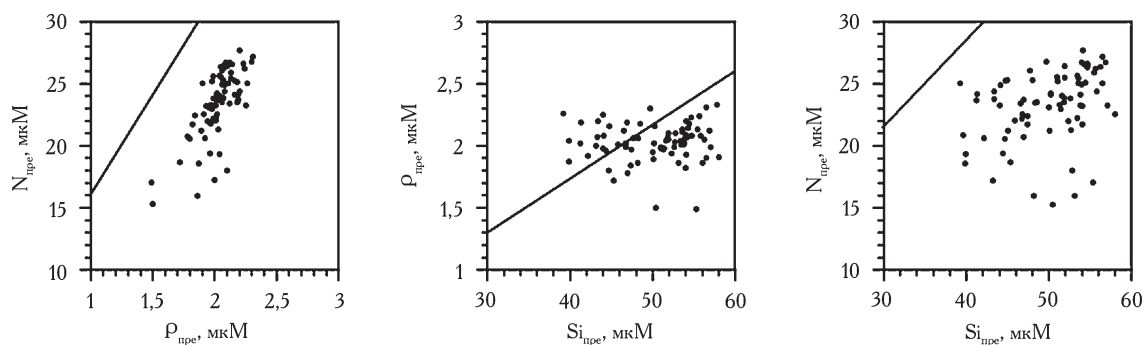
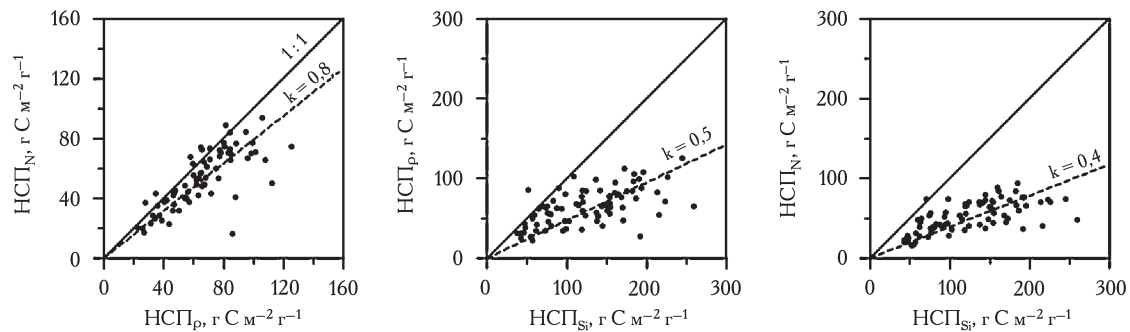


Рис. 6. P-N, Si-P и Si-N диаграммы расчётных зимних концентраций биогенных веществ (или  $Si_{пре}$ ,  $N_{пре}$  и  $P_{пре}$  на нижней границе ХПС). Сплошные линии отражают стехиометрическое соотношение  $Si:N:P = 23:16:1$



**Рис. 7.** Сравнение  $\text{НСП}_{\text{Si}}$ ,  $\text{НСП}_{\text{N}}$  и  $\text{НСП}_{\text{P}}$  на точечных графиках. Сплошные диагональные линии отвечают соотношению 1:1. Пунктирные линии построены по уравнениям регрессии, округлённые значения коэффициента  $k$  приводятся для каждой линии

моря по биомассе обычно доминируют именно диатомовые водоросли [Микаэлян и др., 1995], что вносит существенные изменения в стехиометрию формирования ОВ и сильно отклоняет значения стехиометрического коэффициента кремния от полученных Ф. Ричардсом. В связи с этим приводимые в данной работе оценки  $\text{НСП}_{\text{Si}}$  могут содержать ошибку до 30%. С другой стороны, распределение полученной в данной работе  $\text{НСП}_{\text{Si}} \approx \text{ОПП}$  на качественном уровне соответствует результатам, полученным Э. Брауном с соавторами [2011] с использованием спутниковых данных, и, кроме того, абсолютные значения также сопоставимы. В некоторых случаях приведённые результаты оказались ниже, чем в указанной работе, что может быть связано с условиями конкретного года или с погрешностью спутниковых данных.

Полученные распределения полной и «новой» ПП качественно весьма схожи с результатами Н. В. Аржановой с коллегами [1995]. Однако, абсолютные значения здесь существенно ниже (ОПП на  $50\text{--}500 \text{ г С м}^{-2} \text{ г}^{-1}$ , а «новой» ПП на  $60\text{--}400 \text{ г С м}^{-2} \text{ г}^{-1}$ ). Кроме того, распределение доли «новой» продукции отличается от приведённого Н. В. Аржановой с коллегами. Вероятно, это связано с различными методами расчёта. С учётом того, что представленный результат отражает суммарную продукцию за весь вегетационный сезон, а в указанных ранних вычислениях результат интерполировался на предполагаемый срок вегетационного периода, приводимые значения могут быть более точными за счёт исключения погрешности интерполяции.

«Новая» ПП почти полностью формируется во время весеннего цветения фитопланктона, после которого минеральные соли в продукционном слое часто практически израсходованы, и в дальнейшем продукция осуществляется за счёт регенерации биогенных элементов или при их поступлении из нижележащих слоёв. Оценки НСП для восточного шельфа Берингова моря, выполненные по убыли биогенных элементов во время весеннего «цветения» фитопланктона, показали, что за период цветения интегрально в водной толще может формироваться  $20\text{--}80 \text{ г С м}^{-2}$  [Mordy et al., 2012]. Этот результат поддерживает приводимые здесь характерные значения «новой» продукции.

Сравнение полученных в данной работе значений  $\text{НСП}_{\text{Si}}$ ,  $\text{НСП}_{\text{N}}$  и  $\text{НСП}_{\text{P}}$  (рис. 7) наглядно иллюстрирует, что 60% ОПП синтезируется за счёт реминерализованного в продукционном слое азота, и 50% — за счёт регенерированного фосфора. Вероятно, азот, находящийся в недостатке, скорее оказывается израсходованным полностью, в то время как некоторое количество зимнего запаса фосфора всё ещё доступно фитопланктону. То есть регенерация азота начинается раньше, чем регенерация фосфора. Из приведённых результатов следует, что в таких условиях формируется около 10% общей сезонной ПП, источником азота для которой служит регенерированный азот, а источником фосфора ещё является его зимний запас.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее продуктивными областями западной части Берингова моря в 2012 г. были районы Камчатского пролива, Олюторского залива, Корякского побережья и свала глубин к югу от мыса Наварина. «Новая» ПП, оцененная по убыли общего минерального азота за вегетационный период, составляла там  $60\text{--}80\text{ г С м}^{-2}\text{ г}^{-1}$ , а полная ПП, вычисленная по убыли силикатов, достигала  $150\text{--}250\text{ г С м}^{-2}\text{ г}^{-1}$ . При этом в указанных районах доля «новой» продукции в полной ПП фитопланктона была на относительно низком уровне. Для глубоководных районов Берингова моря были характерны величины «новой» ПП  $20\text{--}60\text{ г С м}^{-2}\text{ г}^{-1}$  при значениях полной ПП в  $50\text{--}150\text{ г С м}^{-2}\text{ г}^{-1}$ .

Продолжением представленной работы может служить проведение подобных расчётов для данных, полученных в летние и осенние месяцы других лет (1990, 1992, 2008, 2010 гг.) .

## ЛИТЕРАТУРА

- Аржанова Н.В., Зубаревич В.А., Сапожников В.В. 1995. Сезонные изменения запасов биогенных элементов в эвфотическом слое и оценка первичной продукции в Беринговом море // Комплексные исследования экосистемы Берингова моря. Сб. науч. трудов. М.: Изд-во ВНИРО. С. 162–179.
- Булатов О.А. 2004. Минтай (*Theragra Chalcogramma*) Берингова моря: размножение, запасы и стратегия управления промыслом. Автореф. дисс. канд. биол. наук. 379 с.
- Виноградов А.П. 1939. Химический состав планктона. Сообщ. 3. // Тр. биохим. лаб. АН СССР.
- Микаэлян А.С., Вентцель М.В., Кокуркина Е.Н. 1995. Вертикальная структура фитопланктонных сообществ в Беринговом и Охотском морях // Комплексные исследования экосистемы Берингова моря. Сб. науч. трудов. М.: Изд-во ВНИРО. С. 294–305.
- Налетова И.А., Сапожников В.В. 1995. Первичная продукция в Беринговом море и сравнительная оценка её определения радиоуглеродным и кислородным методами // Комплексные исследования экосистемы Берингова моря. Сб. науч. трудов. М.: Изд-во ВНИРО. С. 179–189.
- Родионов С.Н., Кровнин А.С. 1991. Влияние термических условий на запасы восточно-берингоморского минтая // Рыбное хозяйство. № 3. С. 21–26.
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. 2003. М.: Изд-во ВНИРО. 202 с.
- Сорокин Ю.И. 1995. Первичная продукция в Беринговом море // Комплексные исследования экосистемы Берингова моря. Сб. науч. трудов. М.: Изд-во ВНИРО. С. 264–276.
- Brown Z. W., Arrigo K. R. 2012. Contrasting Trends in Sea Ice and Primary Production in the Bering Sea and Arctic Ocean // ICES Journal of Marine Science. Vol. 69 (7). P. 1180–1193.
- Brown Z. W., Dijken G. L., Arrigo K. R. 2011. A Reassessment of Primary Production and Environmental Change in the Bering Sea // J. Geophys. Res. 116: C08014.
- Codispoti L. A., Kelly V., Thessen A. et al. 2013. Synthesis of Primary Production in the Arctic Ocean: III. Nitrate and phosphate based estimates of net community production // Prog. Oceanogr. 110. P. 126–150.
- Dugdale, R. C., Goering, J. J. 1967. Uptake of New and Regenerated Forms of Nitrogen in Primary Productivity // Limnol. Oceanogr. 12 (2). P. 196–206.
- Hill V. J., Matrai P. A., Olson E. et al. 2013. Synthesis of Integrated Primary Production in the Arctic Ocean: II. *In situ* and remotely sensed estimates // Prog. Oceanogr. V. 110. P. 107–125.
- Kamatani A. 1982. Dissolution Rates of Silica From Diatoms Decomposing at Various Temperatures // Mar. Biol. V. 68. P. 91–96.
- Khen G. V., Basyuk E. O., Vanin N. S., Matveev V. I. 2013. Hydrography and Biological Resources in the Western Bering Sea // Deep-Sea Res. II. V. 94. P. 106–120.
- Mordy C. W., Cokelet E. D., Ladd C., F. A. Menzies, P. Proctor, P. J. Stabeno, E. Wisegarver. 2011. Net Community Production on the Middle Shelf of the Eastern Bering Sea // Deep-Sea Res. Part II. Topical Studies in Oceanography, Volumes 65–70. P. 110–125.
- Pabi S., van Dijken G. L., Arrigo K. R. 2008. Primary Production in the Arctic Ocean, 1998–2006 // J. Geophys. Res. V. 113 (C8). C08005.
- Redfield A. C. 1958. The Biological Control of Chemical Factors in the Environment // Am. Sci. 46. P. 205–221.
- Richards F. A. 1958. Dissolved Silicate and Related Properties of Some Western North Atlantic and Caribbean Waters // J. Mar. Res. V. 17. P. 449–465.
- Stabeno P. J., Napp J., Mordy C., Whittedge T. 2010. Factors Influencing Physical Structure and Lower Trophic Levels of the Eastern Bering Sea Shelf in

- 2005: Sea Ice, Tides and Winds // *Progress in Oceanography*. V. 85(3). P. 180–196.
- Stepanenko M. A., Gritsay E. V., Glebova S. Yu. 2007. Impact of Environment and Exploitation on the Interannual Variability Eastern Bering Sea Pollock Abundance and Distribution // *PICES Sixteenth Annual Meeting Program and Abstracts*. Victoria, Canada. P. 182, abstract.
- Sverdrup H. U. 1953. On Condition for the Vernal Blooming of Phytoplankton // *J. Cons. Intern. Explor. Mer.* Vol. 18. № 3. P. 287–295.

## Assessment of Primary Production in the Bering with New Approach

K. K. Kivva

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSUE VNIRO, Moscow)

Oceanographic surveys of high spatial resolution were carried out in the western Bering Sea during past few years, which allow estimating primary production in the region based on drawdowns of nutrients. Present work suggests a new method of net ( $\approx$  to new) and gross ( $\approx$  to total) primary production assessment based on summer or autumn nutrients and dissolved oxygen profiles. For 2012, gross (or total) primary production in the region was in range of  $50\text{--}250\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ , while net community (or new) primary production reached  $30\text{--}80\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ . New to total production ratio was in a range of  $0.2\text{--}0.8$ . The presented new method revealed good agreement with previous studies and supposed for use in the future investigations.

**Key words:** Bering Sea, biological productivity, primary production, nutrients.