

УДК 551.46;581.526.3; 630.81

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОЗ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ АССИМИЛЯЦИИ УГЛЕРОДА ПРИРОДНОЙ ПОПУЛЯЦИЕЙ МИКРОПЛАНКТОНА

© 2025 г. М. М. Доманов*, А. Б. Демидов, И. Н. Суханова

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

**e-mail: domanov@ocean.ru*

Поступила в редакцию 30.10.2024 г.

После доработки 18.12.2024 г.

Принята к публикации 16.01.2025 г.

В Карском море выполнено исследование влияния малых доз γ -излучения от внешнего источника ^{40}K ($E\gamma = 1,46$ МэВ) на процесс ассимиляции углерода естественной популяцией микропланктона. Результаты измерения скорости ассимиляции углерода планктонным сообществом при воздействии γ -излучения внешних источников с активностью 269 Бк и 376 Бк, показали разнонаправленный эффект его влияния на ассимиляцию углерода на свету и в темноте. В поверхностном слое скорость ассимиляции углерода в светлых пробах при активности источника 269 Бк увеличилась в среднем в 1.2 раза. Показано, что при активности источника γ -излучения 376 Бк средняя скорость ассимиляции углерода на свету увеличивается в среднем в 1.4 раза. Сравнение скорости темновой ассимиляции углерода при γ -излучении источников с активностью 269 Бк и 376 Бк, показало ее снижение в среднем в 1.6 раза относительно фона независимо от мощности дозы.

Ключевые слова: радиоэкология, низкие мощности доз, ассимиляция углерода, Карское море

DOI: 10.31857/S0030157425040073

ВВЕДЕНИЕ

Исследование влияния малых доз радиоактивности на биоту показали, что низкие дозы гамма-излучения могут оказывать благоприятное воздействие на развитие организмов [16], а природный радиоактивный фон является важным фактором для развития биологических процессов в биосфере Земли [4]. Механизм влияния ионизирующего излучения на ассимиляцию углерода в процессе фотосинтеза исследован в работах [7, 11, 12, 14, 16]. Показано, что реакция организма на ионизирующее излучение и интенсивность ассимиляции углерода зависит от внутренних факторов (вида, стадии развития и физиологического состояния организма) и внешних факторов. Приведены данные об эффектах влияния ионизирующей радиации на физиологические и молекулярные процессы [2, 13, 15, 17, 22].

Исследование закономерности изменения состава и структуры фитопланктонных сообществ в зависимости от уровня радиационного воздействия рассмотрены в работах [1, 25]. Однако эти исследования были выполнены на примере отдельных видов в изолированных экосистемах.

При этом мощности доз радиоактивного излучения техногенных радионуклидов на порядки превышали естественный радиоактивный фон и были близки к летальным дозам для исследуемых популяций фитопланктона. Исследования влияния малых доз γ -излучения на скорость ассимиляции углерода природными сообществами микропланктона никогда ранее не проводились. Такие работы актуальны в свете изучения возрастающей антропогенной нагрузки на прибрежные экосистемы Арктики. При этом постепенное ослабление воздействия внешнего излучения при удалении от источника радиоактивного загрязнения может приводить к смене эффекта этого влияния с отрицательного на положительный и наоборот.

Целью настоящей работы являлась оценка влияния малых доз γ -излучения от внешнего источника на интенсивность ассимиляции углерода сообществом микропланктона непосредственно в естественных условиях. Такие данные необходимы для прогноза структурных изменений в экосистеме при изменении радиоэкологической ситуации под действием естественных и антропогенных факторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследования и отбор проб. Гидрохимические и гидрофизические условия в исследованных районах обусловлены изменениями среды в зонах взаимодействия стока с материка и островов и морских вод [5, 8]. Пробы для эксперимента были отобраны из поверхностного горизонта на станциях, выполненных с 12 по 17 октября 2023 г. в Обской губе и заливе Благополучия (восточный берег архипелага Новая Земля) Карского моря во время 92 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” (рис. 1).

Отбор проб осуществлялся 5-литровыми пластиковыми батометрами комплекса Cagoussel Water Sampler. Горизонт, с которого отбиралась поверхностная проба, соответствовал ~1 м. Определение температуры, электропроводности и флуоресценции проводилось CTD-зондом SBE-911 Plus (Seabird Electronics, США).

Условия проведения эксперимента. Для сохранения идентичных условий естественного состояния взятой пробы фитопланктона в процессе эксперимента (температуры, солености, концентрации биогенных элементов, видового состава, освещенности), отобранные пробы воды с содержащимся в них фитопланктоном, помещали в инкубатор, который был установлен на палубе судна и заполнен морской водой, температура которой была равна температуре заборной воды. Для экспериментальной оценки влияния γ -облучения на интенсивность ассимиляции углерода

естественной популяцией выполнены измерения количества ассимилированного углерода при световой экспозиции проб и в темноте в присутствии источника γ -излучения и без него.

Экспозицию проб (250 мл в прозрачном пластмассовом флаконе) проводили при естественном освещении в течение светового дня. Затемнение пробы достигалось помещением экспериментального флакона в светонепроницаемый мешок из плотной черной ткани.

В качестве источников источника γ облучения был использован ^{40}K ($E_\gamma = 1.46$ МэВ) в виде соли KCl. Удельная активность калия-40 в хлориде калия составляет 16.3 Бк/г. Вероятность распада ^{40}K с испусканием гамма-кванта с энергией 1.46 МэВ составляет 11%, а вероятность распада с испусканием электронов составляет 88%. Экспозиция проб воды содержащих фитопланктон проводилась в полиэтиленовых флаконах, оболочка которых поглощает испускаемые источником электроны, поэтому влияние электронного излучения от внешнего источника на пробы не учитывалось.

В работе использованы 2 источника γ излучения с навеской соли KCl 150 г и 210 г. Гамма-активность источников составляла 269 Бк и 376 Бк соответственно. Мощности дозы от источников 269 Бк и 376 Бк в воде на расстоянии 1 см равны 0.0138 мкГр/час и 0.0193 мкГр/час соответственно.

Мощность дозы D Гр/час рассчитывали по формуле

$$D = A \times K_\gamma \times K/R^2$$

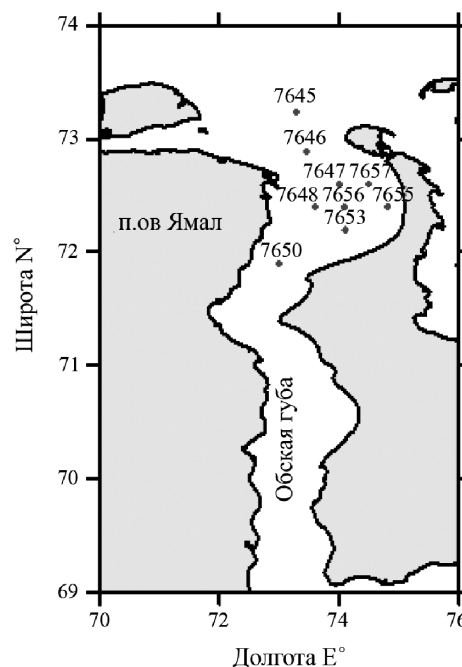
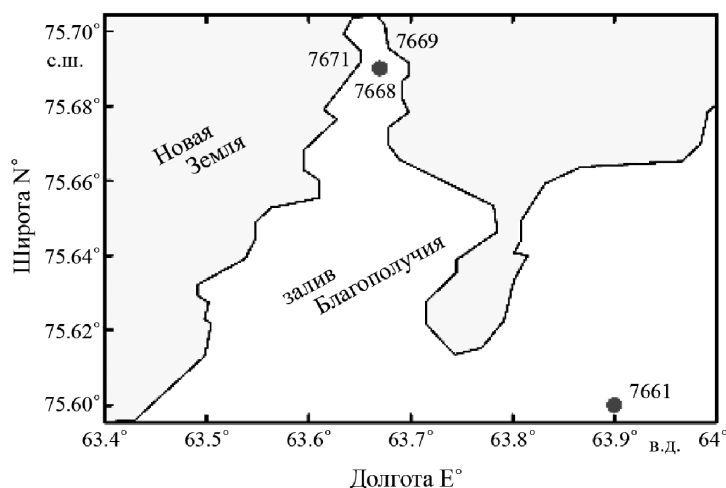


Рис. 1. Станции отбора проб в Обской губе и в заливе Благополучия.

где: A — активность источника мКюри; $K\gamma$ — гамма постоянная $\frac{P_{\text{см}^2}}{\text{мКи час}}$ для $K^{40} = 0.19 \frac{P_{\text{см}^2}}{\text{мКи час}}$; K — коэффициент 0.01 Гр/Р; R — расстояний до объекта см; P — рентген/час.

Измерение скорости ассимиляции углерода выполняли радиоуглеродным методом в светлых и темных склянках [23]. Точность определения 15% [21]. Флаконы предварительно обрабатывались 1 N HCl для устранения возможного загрязнения. После добавления меченого по углероду гидрокарбоната натрия ($\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$) активностью 1.25 μCi в каждый флакон пробы экспонировали в течение полного светового дня (6.75–8.6 ч) в палубном инкубаторе при естественном освещении. После экспозиции пробы были профильтрованы через мембранные фильтры из нитроцеллюлозы “Владипор” МФАС-ОС-2 (Владимир, Россия) с размером пор 0.45 μm под вакуумом не более 0.1 атм. После фильтрации пробы промывали фильтрованной морской водой, высушивали при комнатной температуре в течение 3–4 ч и помещали в сцинтилляционный флакон. После добавления 10 мл сцинтилляционного коктейля “Optiphase HiSafe III” (PerkinElmer, США) учет активности фильтров проводили на сцинтилляционном радиометре “Triathler” (Hidex, Финляндия).

Определение биомассы и таксономического состава фитопланктона. Для определения биомассы фитопланктон из проб объемом 2 л концентрировали методом мягкой обратной фильтрации на лавсановом фильтре с диаметром пор 1 мкм [9]. Большая часть проб была обработана без фиксации в живом состоянии сразу же после их отбора. Оставшиеся пробы были зафиксированы 10% нейтральным раствором формалина (конечная

концентрация 0.5%) и обработаны через несколько месяцев в лаборатории Института океанологии РАН. Обработку проб фитопланктона вели в камерах Ножотта (объем 0.084 мл) при увеличении $\times 400$ и Наумана (объем 1 мл) при увеличении $\times 200$ под микроскопами Jena Lumar и Leica. В камере Ножотта учитывали клетки с диаметром > 3 мкм; крупные редкие виды просчитывали в камере Наумана. При обработке нефиксированного материала аликвоты проб просматривали в камере Ножотта при люминесцентном освещении под микроскопом Jena Lumar для учета гетеротрофных форм, главным образом динофлагеллят и флагеллят. Расчет сырой биомассы (объема) делался на основе принципа геометрического подобия [3] с использованием данных собственных измерений линейных размеров клеток. Для массовых видов промерялось около 100 клеток. Содержание углерода в клетках рассчитывали, используя соответствующие коэффициенты для разных таксономических и размерных групп [18, 24].

Статистический анализ. Были применены методы непараметрической статистики. Такой подход имеет преимущество, поскольку не требует проверки нормальности распределения анализируемых массивов данных. В качестве средних величин были использованы медианы (Me). Достоверность различий сравниваемых массивов данных оценивалась с помощью теста Манна-Уитни (Mann-Whitney U -test).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Координаты станций и характеристики отобранных проб воды приведены в таблице 1.

Основная ассимиляция углерода, как правило, $> 50\%$, природным сообществом микропланктона

Таблица 1. Координаты станций и характеристики района отбора проб воды.

Дата	Станции	Широта, N°	Долгота, E°	T , C°	Соленость, ‰	Световой день, час	Хлорофилл, мг/м ³
11.10.2023	7645	73.24	73.28	2.12	15.79	8.77	0.66
11.10.2023	7647	72.6	74.0	2.1	16.6	8.8	0.6
12.10.2023	7648	72.4	73.6	2.9	11.5	8.8	0.8
12.10.2023	7650	71.9	73.0	3.9	6.6	8.6	1.1
13.10.2023	7653	72.2	74.1	2.3	10.8	8.6	0.9
13.10.2023	7655	72.4	74.8	1.9	14.1	8.3	0.6
13.10.2023	7656	72.4	74.1	2.2	12.7	8.3	0.7
13.10.2023	7657	72.6	74.5	1.9	15.1	8.3	0.7
14.10.2023	7661	75.6	63.9	1.1	25.4	7.3	0.2
15.10.2023	7668	75.7	63.7	0.7	25.0	7.0	0.2
16.10.2023	7669	75.7	63.7	0.8	25.1	6.8	0.2

происходит в процессе фотосинтеза фитопланктона. Численность и биомасса основных таксономических групп крупного (> 3 мкм) фитопланктона представлены в табл. 2.

На рис. 2 и 3 приведены величины скорости ассимиляции углерода мгС/м^3 час в поверхностном слое на станциях в Карском море, полученные в естественных условиях среды обитания

фитопланктона (Фон) и после воздействия внешнего γ -излучения активностью 269 Бк и 376 Бк соответственно.

При воздействии источника γ -излучения с активностью 269 Бк скорость ассимиляции углерода в светлых пробах увеличилась, согласно *Me*, в 1.18 раз, а темновая ассимиляция снизилась в 2.29 раз (табл. 3).

Таблица 2. Численность клеток ($N \times 10^3$ кл/л) в числителе и сырая биомасса (мг/м^3) в знаменателе основных таксономических групп фитопланктона

Станция	Диатомеи	Динофлагелляты	Криптофиты	Прочие	Сумма
7645	$\frac{35.3}{9.2}$	$\frac{3.4}{1.6}$	$\frac{15.0}{8.5}$	$\frac{6.2}{1.2}$	$\frac{59.5}{20.6}$
7647	$\frac{36.7}{7.3}$	$\frac{1.4}{2.3}$	$\frac{13.7}{5.6}$	$\frac{18.0}{1.3}$	$\frac{69.8}{16.6}$
7648	$\frac{35.6}{8.9}$	$\frac{4.4}{4.2}$	$\frac{16.8}{2.0}$	$\frac{26.8}{0.9}$	$\frac{83.6}{16.0}$
7650	$\frac{16.3}{9.1}$	$\frac{2.2}{0.6}$	$\frac{4.6}{4.0}$	$\frac{12.0}{2.0}$	$\frac{35.1}{15.7}$
7653	$\frac{30.8}{10.7}$	$\frac{4.9}{6.7}$	$\frac{6.2}{4.4}$	$\frac{6.3}{1.6}$	$\frac{48.2}{23.4}$
7655	$\frac{18.4}{8.2}$	$\frac{0.8}{2.8}$	$\frac{5.3}{2.4}$	$\frac{9.4}{1.5}$	$\frac{33.9}{11.9}$
7656	$\frac{1.6}{10.1}$	$\frac{0.4}{11.4}$	1.8	$\frac{66.2}{0.7}$	$\frac{68.1}{24.0}$
7657	$\frac{8.0}{0.6}$	$\frac{1.8}{3.9}$	1.8	$\frac{56.8}{0.7}$	$\frac{59.2}{14.4}$
7661	$\frac{4.8}{34.8}$	$\frac{2.5}{5.0}$		$\frac{49.0}{8.2}$	$\frac{52.3}{47.8}$
7668	$\frac{35.3}{23.4}$	$\frac{3.4}{1.4}$	15.0	$\frac{6.2}{7.4}$	$\frac{59.5}{32.2}$
7669	$\frac{36.7}{17.1}$	$\frac{1.4}{4.0}$	13.7	$\frac{18.0}{6.0}$	$\frac{69.8}{27.1}$

Таблица 3. Скорость ассимиляции углерода мгС/м^3 час на свету и в темноте в контрольных пробах (Фон), скорость ассимиляции при активности внешнего источника γ -излучения 269 Бк (A_1), разность между фоновым значением и скоростью ассимиляции при активности источника ($A_1 - \text{Фон}$) и отношение этих величин ($A_1/\text{Фон}$).

Станции	Светлые пробы				Темные пробы			
	Фон	(A_1)	($A_1 - \text{Фон}$)	($A_1/\text{Фон}$)	Фон	(A_1)	($A_1 - \text{Фон}$)	($A_1/\text{Фон}$)
7645	0.86	1.07	0.21	1.25	0.16	0.07	-0.08	0.48
7647	0.65	0.90	0.24	1.37	0.13	0.06	-0.07	0.47
7648	0.82	1.04	0.22	1.27	0.18	0.10	-0.09	0.52
7650	0.96	0.97	0.01	1.01	0.23	0.09	-0.14	0.40
7653	0.81	0.96	0.15	1.18	0.18	0.08	-0.11	0.41
7655	0.44	0.63	0.19	1.43	0.15	0.06	-0.09	0.41
7656	0.51	0.54	0.03	1.07	0.18	0.08	-0.11	0.42
7657	0.52	0.54	0.02	1.04	0.20	0.06	-0.14	0.32
7661	0.28	0.43	0.15	1.52	0.07	0.03	-0.03	0.51
7668	0.31	0.35	0.03	1.10	0.11	0.04	-0.07	0.39
7669	0.24	0.26	0.01	1.05	0.10	0.09	-0.01	0.94
<i>Me</i>	0.52	0.63	0.15	1.18	0.16	0.07	-0.09	0.42

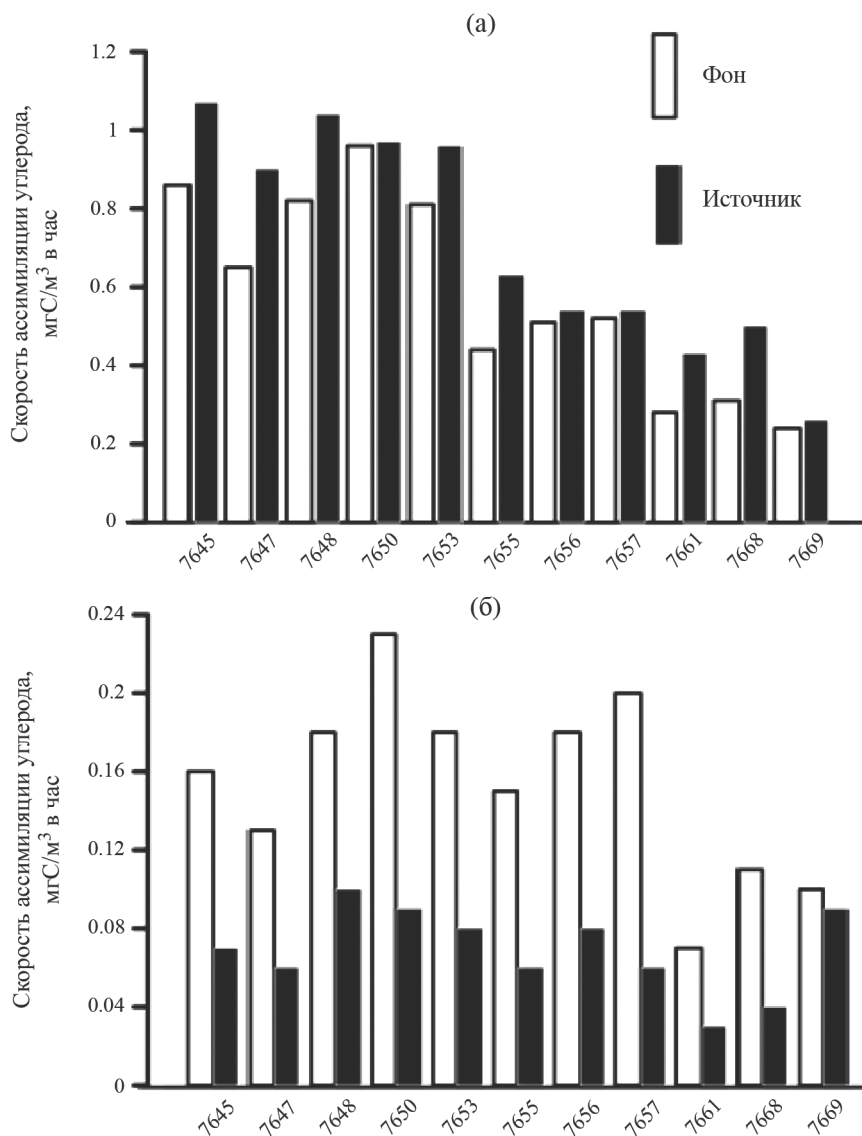


Рис. 2. Скорость ассимиляции углерода на свету (а) и в темноте (б) при активности внешнего γ -излучения 269 Бк. На оси абсцисс указаны номера станций

Различия Фона и Активности при темновой ассимиляции оказались достоверными при $p = 0.001$ (Mann–Whitney U -test). Меньшая достоверность была зарегистрирована при сравнении Фона и Активности в светлых склянках ($p = 0.250$, Mann–Whitney U -test).

В таблице 4 приведены величины скорости ассимиляции углерода мгС/м³ час на свету и в темноте для станций, на которых проводились параллельные измерения при разных величинах активности источников 269 Бк и 376 Бк соответственно.

При увеличении активности источника до 376 Бк различия (А-Фон) для темновой ассимиляции оказались достоверными при $p = 0.027$ (Mann–Whitney U -test). В случае облучения с ак-

тивностью 269 Бк, в светлых пробах достоверность отличий (А-Фон) снизилась ($p = 0.175$, Mann–Whitney U -test). Результаты, приведенные в табл. 4, показывают, что при увеличении активности источников γ -излучения с 269 Бк до 376 Бк величина средней скорости ассимиляции углерода на свету возросла в 1.2 раза, а скорость темновой ассимиляции не изменилась.

ОБСУЖДЕНИЕ

В ассимиляцию углерода природным сообществом микропланктона вносят вклад процессы фотосинтеза фитопланктона и фотосинтезирующих бактерий, хемосинтеза автотрофных бактерий и архей и поглощение CO_2 для анаэробических реакций, не связанных с образованием

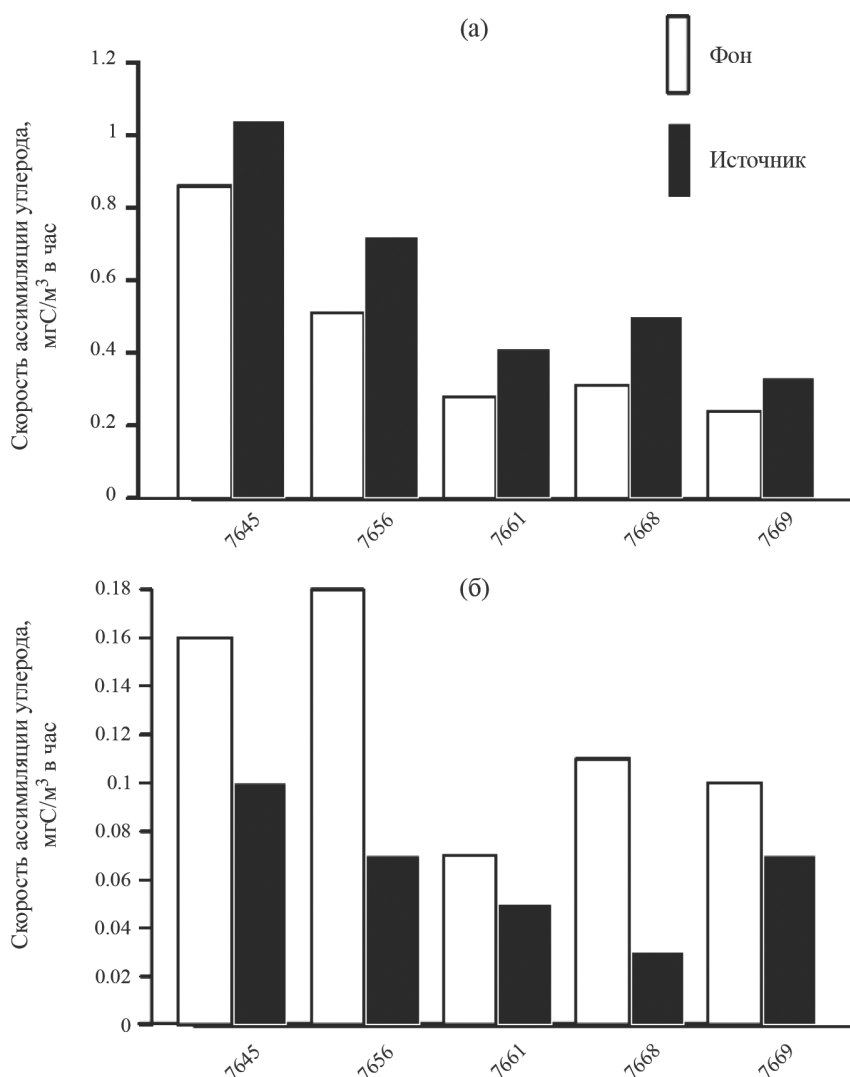


Рис. 3. Скорость ассимиляции углерода на свету (а) и в темноте (б) при активности внешнего γ -излучения 376 Бк. На оси абсцисс указаны номера станций.

Таблица 4. Скорость ассимиляция углерода mgC/m^3 час на свету и в темноте в контрольных пробах (Фон), скорость ассимиляции при активности источников (А) 299 Бк (числитель) и 376 Бк (знаменатель), разница в величине скорости ассимиляции между фоновым значением и скоростью ассимиляции при соответствующих активностях источников облучения (А-Фон) и отношение этих величин (А/Фон).

Станции	Светлые пробы				Темные пробы			
	Фон	(А)	(А- Фон)	(А/Фон)	Фон	(А)	(А- Фон)	(А/Фон)
7645	0.86	1.07	0.21	1.2	0.16	0.07	-0.08	0.48
		1.04	0.18	1.2		0.10	-0.06	0.61
7656	0.51	0.54	0.03	1.07	0.18	0.08	-0.11	0.42
		0.72	0.21	1.41		0.07	-0.12	0.36
7661	0.28	0.43	0.15	1.52	0.07	0.03	-0.03	0.51
		0.41	0.12	1.44		0.05	-0.01	0.81
7668	0.31	0.35	0.03	1.10	0.11	0.04	-0.07	0.39
		0.5	0.19	1.61		0.03	-0.08	0.25
7669	0.24	0.26	0.01	1.05	0.10	0.09	-0.01	0.94
		0.33	0.08	1.34		0.07	-0.03	0.68
Me	0.31	0.43	0.03	1.10	0.11	0.07	-0.07	0.48
		0.50	0.18	1.41		0.07	-0.06	0.61

органического вещества. Ассимиляция углерода сообществом на свету связана в основном с фотосинтезом фитопланктона. Вклад в общую ассимиляцию процессов, не связанных с фотосинтезом, очень изменчив и может составлять от первых процентов до величины $>50\%$ [20]. В представленных экспериментах средний вклад темновой ассимиляции в общую ассимиляцию углерода в контрольных пробах составил 31%, а в пробах, подверженных внешнему γ -излучению — 15%.

Таким образом, увеличение скорости ассимиляции углерода в светлых пробах свидетельствует о стимулирующем эффекте γ -излучения, прежде всего, на процесс фотосинтеза. Вместе с тем показано, что внешнее γ -излучение ингибирует процесс темновой ассимиляции углерода. Для всех станций средняя величина снижения скорости темновой ассимиляции по сравнению с фоновым значением равна $0.07 \text{ мгС/м}^3 \text{ час}$, а максимальный эффект снижения скорости темновой ассимиляции достигает $0.10 \text{ мгС/м}^3 \text{ час}$. Увеличение активностей источников с 269 до 376 Бк подтвердило разнонаправленный эффект влияния γ -излучения на процесс ассимиляции углерода. Процессы ассимиляции углерода на свету ускоряются, а процессы темновой ассимиляции замедляются. Одним из объяснений такого эффекта может служить снижение количества органических кислот, образуемых при темновой фиксации CO_2 , как показано в работе [6].

Увеличение мощности дозы облучения воды за счет внешнего γ -излучения вызвало усиление процесса радиолитического разложения воды и образования свободных радикалов на который идет 80% энергии ионизирующей радиации [10]. В результате вызванного γ -излучением окислительного стресса, возникает перепроизводство активных форм кислорода, таких как супероксидные радикалы (O_2^-), гидроксильные радикалы (OH^-) и H_2O_2 , которым Р.А. Parsons [19] отводил ключевую роль в формировании стимулирующих эффектов. Именно свободные радикалы и акцепторы электронов, как считает Р.А. Parsons, являются инициаторами всех процессов, ведущих к формированию эффекта, и только их соотношение определяет положительным или негативным будет результат воздействия γ -излучения.

Выполненные исследования согласуются с данными работы [1], где было показано, что в диапазоне дозовых нагрузок, превышающих естественный фон на один-два порядка, проявляются как депрессивные, так и стимулирующие эффекты и активируются репарационные и компенсационные механизмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе зафиксирован факт воздействия малых доз внешнего γ -излучения на процесс ассимиляции углерода природным сообществом микропланктона. Это своего рода интегральный эффект, так как при данном подходе к проведению эксперимента невозможно вычленить влияние радиоактивного излучения отдельно на таксономические группы, составляющие это сообщество (фитопланктон, бактерии, археи и др.). Однако такая модель эксперимента позволила показать, что внешнее облучение оказывает стимулирующий эффект прежде всего на фотосинтез, в то время как темновая ассимиляция подавляется. Определение и оценка доминирующих факторов в процессе ингибирования темновой ассимиляции углерода при воздействии малых доз радиоактивного излучения на фитоценоз планируется в дальнейших исследованиях.

Вклады авторов. М.М. Доманов — разработка концепции, написание основной части текста статьи, подготовка иллюстративного материала. А.Б. Демидов — проведение экспериментов, написание части текста статьи, подготовка иллюстративного материала. И.Н. Суханова — обеспечение данными.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках Государственного задания FMWE-2024-0021.

Соблюдение этических стандартов. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонова Н.Н., Зайцев В.В. К вопросу о калибровке кривой Басби-Бурлаковой при малых дозах ионизирующего облучения // Материалы Международной конференции “Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды”. Сыктывкар, 2014. С. 19–22.
2. Гудков С.В. Частные вопросы радиационной биологии: Учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022. 235 с.
3. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.: Наука, 1969. 367 с.
4. Кузин А.М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. М.: Наука, 1991. 116 с.

5. *Ланин С.А.* Особенности формирования пресноводного стока в эстуарных системах Оби и Енисея // Труды ВНИРО. 2017. Т. 166. С. 139–150.
6. *Мокроносов А.Т.* Фотосинтетическая и гетеротрофная ассимиляция углерода в онтогенезе растений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Институт физиологии растений им К.А. Тимирязева Академии Наук СССР. М., 1966. 42 с.
7. *Пряхин Е.А., Духовная Н.И., Тряпицына Г.А. и др.* Фитопланктон водоема В–11 Теченского каскада водоемов ПО “Маяк” // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50. № 4. С. 423–433.
8. *Степанова С.В., Недоспасов А.А.* Особенности гидрофизического и гидрохимического режимов залива Благополучия (Новая Земля) // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 75–85.
9. *Суханова И.Н.* Концентрирование фитопланктона в пробе // Современные методы количественной оценки распределения морского планктона / Под ред. М.Е. Виноградова. М.: Наука, 1983. С. 97–105.
10. *Adams G.E.D.* 1986. Radiation carcinogenesis. In *Introduction of the Cellular and Molecular Biology of Cancer*. Edited by L.M. Franks and N. Teich (Oxford: Oxford University Press). P. 154–175.
11. *Ahuja S., Kumar M., Kumar P. et al.* Metabolic and biochemical changes caused by gamma irradiation in plants // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2014. V. 300. P. 1–14.
12. *De Micco V., Arena C., Pignalosa D., Durante M.* Effects of Sparsely and Densely Ionizing Radiation on Plants // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2011. V. 50 (1). P. 1–19.
13. *Effects of ionizing radiation on aquatic organisms and ecosystems.* IAEA, VIENNA, 1976. STI/DOC/10/17 2 ISBN 92-0-125076-2 143. International Atomic Energy Agency VIENNA, 1976. Technical Reports Series No. 172.
14. *Geras'kin S.A., Dikarev V.G., Zyablitskaya Ye. Ya. et al.* Genetic consequences of radioactive contamination by the Chernobyl fallout to agricultural crops // J. Environ. Radioactiv. 2003. V. 66. Iss.1–2. P. 155–169.
15. *Gudkov S.V., Grinberg M.A., Sukhov V., Vodeneev V.* Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants // *Journ. Of Env. Radioact.* 2019. V. 202. P. 8–24.
16. *Jan S., Parween T., Siddiqi T.O., Mahmooduzzafar.* Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products // *Environ. Rev.* 2012. V. 20. № 1. P. 17–39.
17. *Luckey T.D.* *Hormesis with Ionizing Radiation.* Tokyo: Boca Raton Publisher CRC Press, 1980. 222 p.
18. *Menden-Deuer S., Lessard E.J.* Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms and other protist plankton // *Limnol. Oceanogr.* 2000. V. 45. № 3. P. 569–579.
19. *Parsons P.A.* Radiation hormesis: an evolutionary expectation and the evidence // *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation*. 1990. V. 41. № 9. P. 857–860.
20. *Prakash A., Sheldon R., Sutcliffe Jr.W.* Geographic variation of oceanic ^{14}C dark uptake // *Limnol. Oceanogr.* 1991. V. 36. № 1. P. 30–39.
21. *Richardson K.* Comparison of ^{14}C primary production determinations made by different laboratories // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1991. V. 72. P. 189–201.
22. *Riley P.A.* Free radicals in biology: Oxidative stress and the effects of ionizing radiation // *Int. J. Radiat. Biol.* 1994. V. 65. № 1. P. 27–33.
23. *Steemann Nielsen E.* The use of radioactive carbon (C^{14}) for measuring organic production in the sea // *J. Cons. Perm. Ins. Explor. Mer.* 1952. V. 18. P. 117–140.
24. *Strathmann R.R.* Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume, cell area or plasma volume // *Limnol. Oceanogr.* 1967. V.12. № 3. P. 411–418.
25. *Thorring H., Brown J.E., Hosseini A.* Characterization of background dose-rates for marine environments // *Radioprotection*. 2009. V. 44. № 5. P. 595–600.

THE EFFECT OF SMALL DOSES OF γ -RADIATION ON CARBON ASSIMILATION BY A NATURAL COMMUNITY OF MICROPLANKTON

M. M. Domanov*, A. B. Demidov, I. N. Sukhanova

Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow, Russia

**domanov@ocean.ru*

In the Kara Sea, a study was conducted on the effect of small doses of γ -radiation from an external source of ^{40}K ($E\gamma=1.46$ MeV) on the process of carbon assimilation by a natural population of microplankton. The results of measuring the rate of carbon assimilation by the plankton community under the influence of γ -radiation from external sources with an activity of 269 Bq and 376 Bq showed a multidirectional effect of its influence on carbon assimilation in the light and in the dark. In the surface layer, the rate of carbon assimilation in light samples with a source activity of 269 Bq increased by an average of 1.2 times. It was shown that with a γ -radiation source activity of 376 Bq, the average rate of carbon assimilation in the light increases by an average of 1.4 times. A comparison of the rate of dark carbon assimilation in γ -radiation from sources with an activity of 269 Bq and 376 Bq showed its decrease by an average of 1.6 times relative to the background, regardless of the dose rate.

Keywords: radioecology, low dose rates, carbon assimilation, Kara Sea