

ВЛИЯНИЕ ТАЙФУНА “ГОНИ” НА ПРОДУКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ЗАЛИВА ПОСЬЕТА ЯПОНСКОГО МОРЯ¹

© 2021 г. С. П. Захарков^а *, Т. Н. Гордейчук^а, Ю. В. Шамбарова^а, Е. А. Штрайхерт^а

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,
Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: zakharkov@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 09.06.2020 г.

Рассмотрены последствия, вызванные прохождением тайфуна “Гони” в прибрежных водах зал. Посьета Японского моря. С помощью профилографа SBE-19plus в ходе береговых экспедиций измерялись гидрологические характеристики: температура, соленость и гидробиологические показатели флуоресценции хлорофилла *a* и окрашенного растворенного органического вещества спустя неделю после прохождения тайфуна. Для выявления влияния тайфуна на экосистему данные, измеренные после прохождения тайфуна, сравнивались с соответствующими показателями, полученными в близких координатах в один и тот же сезон годом ранее, без тайфуна. Выявлена высокая связь между концентрацией хлорофилла *a* и поступлением пресных вод с континента. Показано, что окрашенное растворенное органическое вещество определяется, наряду с континентальным выносом, автотонными процессами. Для решения поставленной в работе задачи привлекались спутниковые данные, которые позволили наблюдать изменения экосистемы на больших акваториях и установить, что произошедшие в результате воздействия тайфуна изменения приближают прибрежную зону к состоянию эстуариев рек.

Ключевые слова: тайфун, гидрологические и гидробиологические характеристики, дистанционные исследования, эстуарии рек.

DOI: 10.31857/S0321059621020176

Приморский край относится к регионам, наиболее подверженным тайфунам. Время их выхода в умеренные широты Дальнего Востока наблюдается с июля по сентябрь. Тайфун “Гони” (с корейского “Лебедь”) накрыл Приморье 27 августа 2015 г. и принес рекордное количество осадков. Аналогичные по силе тайфуны наблюдаются в Приморском крае раз в каждые 6–10 лет [2]. Усиление ветра и большое количество осадков – основные характеристики физического воздействия тайфунов. Особенно подвержены ударам стихии континентальные шельфы. Эта область морской акватории имеет малую глубину, и физические нарушения могут изменять гидрологические и через них – гидробиологические параметры, один из которых – фитопланктон [22–24, 27, 34, 35]. Эти изменения могут сохраняться от нескольких недель до месяца [12, 17, 18, 20, 21, 28, 36].

В качестве показателя физиологического состояния фитопланктона наиболее часто используется пигмент микроводорослей хлорофилл *a*. Содержание пигмента в морском фитопланктоне служит важной характеристикой оценки первичной биопродуктивности вод и позволяет выявить короткопериодные изменения, происходящие в экосистемах под воздействием различных природных процессов. Есть закономерная связь между его количеством и величиной продукции фитопланктона [9, 10].

Прохождение тайфунов способствует увеличению концентрации хлорофилла *a* (КХЛ) и, соответственно, повышению биопродуктивности вод [22, 23, 26, 35]. Известно, что интенсивность фотосинтеза связана с рядом условий, основные из которых – освещенность и концентрация биогенных элементов. Ветры, сопровождающие стихию, способствуют увеличению поступления питательных элементов в зону фотосинтеза. Богатые биогенами глубинные воды поступают в поверхностные слои, в результате чего происхо-

¹ Финансирование работы проведено в рамках Федерального Государственного проекта АААА-А17-117030110033-0.

дит уменьшение температуры поверхности моря и образование первичной продукции (ПП). При этом сообщается, что именно сила ветра тайфуна и время его прохождения индуцируют цветение фитопланктона [28]. Усиленный материковый сток после обильных осадков обуславливает дополнительное поступление биогенов в прибрежные воды, приводящее к значительному увеличению концентрации фитопланктона [20, 24, 25]. Наряду с биогенами в прибрежные воды поступает растворенное органическое вещество (РОВ) — неотъемлемое содержимое вод, которое бывает аллохтонного и автохтонного происхождения.

Несмотря на большой научный интерес к последствиям тайфунов, влияние их на фитопланктон и присутствующее во всех типах природной воды РОВ изучено недостаточно. При этом фитопланктон, первичный источник энергии в пищевых цепях наряду с РОВ, — один из самых важных климатообразующих факторов. Обильное развитие фитопланктона в водоемах напрямую связано со снижением углекислого газа в атмосфере планеты, от количества которого зависит “парниковый эффект”. Участие микроводорослей в процессе поглощения углерода подтверждено в работе [29]. РОВ природного происхождения — также один из наиболее важных компонентов пресноводных и морских экосистем, ключевой фактор кругооборота углерода и изменения климата на нашей планете [3].

Работа посвящена изучению влияния прохождения тайфуна “Гони” на продуктивность прибрежных вод зал. Посыета Японского моря. При изучении пространственно-временной изменчивости фитопланктона и органического вещества наряду с традиционными методами исследования использованы новые подходы, обеспеченные космическими оптическими датчиками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены в ходе прибрежных экспедиций на стандартном разрезе на суточных станциях (рис. 1) 06.09.2014–07.09.2014 г. (год без тайфуна) и 05.09.2015–06.09.2015 г. (спустя неделю после прохождения тайфуна “Гони”). Координаты станций разреза были одними и теми же в разные годы: $42^{\circ}28'–42^{\circ}34'$ с.ш. и $131^{\circ}7'$ в.д.; якорной станции в 2014 г. — $42^{\circ}34.8'$ с.ш. и $131^{\circ}36.3'$ в.д.; якорной станции в 2015 г. — $42^{\circ}34.5'$ с.ш. и $131^{\circ}36.8'$ в.д. Для исследований использовалось малое научно-исследовательское судно (НИС) “Малахит”. Интенсивность флуоресценции хлорофилла *a* (ФХЛ) окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ), температуру *T*, соленость *S* и интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) измеряли профилографом SBE-19plus, установленным на судне. Гидрологический разрез включал 7 точек (станции 1–7) на трассе: п-ов Га-

мова — шельфовый склон Японского моря. Зондирование на разрезе проводили с интервалом между станциями в 1 милю, на якорной станции — каждый час в течение суток. Измерения проводили по прямому и обратному ходу судна. В расчетах использовали данные прямого хода, за исключением расчетов в целях сравнения параметра *S*, приведенного в табл. 1. Ошибки измерений профилографа по *T* — $\leq 0.01^{\circ}\text{C}$, по *S* воды — 0.02% . Для измерения ФХЛ использовали прокачиваемый флуоресцентный датчик с чувствительностью от 0.03 мкг/л, диапазоном измерений 0.03–75.00 мкг/л (“WetLabs”); ОРОВ — прокачиваемый флуоресцентный датчик с чувствительностью от 10^{-7} г/кг, диапазоном измерений 0– 10^{-3} г/кг, длиной волны возбуждения флуоресценции 370 нм, длиной волны регистрации флуоресценции 460 нм (“WetLabs”). Концентрацию ОРОВ определяли по его флуоресценции, используя заводские калибровки (по сульфату хинина). Установлена очень высокая связь между показаниями ФХЛ ОРОВ и общей концентрацией растворенного органического углерода для прибора “SBE-19plus”. Коэффициент детерминации равнялся 0.96 для разных лет [14]. Параллельно с измерением ФХЛ фитопланктона измеряли КХЛ. Данные о КХЛ использовали для калибровки зонда при измерении ФХЛ. Отбор проб воды для анализа на содержание КХЛ проводили с НИС батометрами Нискина объемом 5 л с различных горизонтов, кратных величинам прозрачности воды по диску Секки (0.5, 1.5, 3). На суточных станциях пробы отбирались, как правило, с глубины 1.5–2.0 м. Отобранные пробы объемом 1.0–1.5 л фильтровали через мембранные фильтры “Vladipog” диаметром 35 мм с размером пор 0.6 мкм. Фильтрацию осуществляли под разрежением ≤ 1.5 м водяного столба. Образцы замораживали и хранили при температуре -18°C . В лаборатории на берегу их впоследствии экстрагировали в 90%-м растворе ацетона и измеряли на спектрофотометре [4]. Использовали статистические методы обработки материала [5], где для 71 пары измерений (в данном случае) при уровне значимости 0.001 все значения коэффициента корреляции выше критического уровня 0.3799 — значимые. Уровень ПП фитопланктона, необходимый при расчете ассимиляционного числа, определяли радиоуглеродным методом по методике, описанной авторами статьи ранее [6, 7]. ФАР, используемый в расчетах ПП, определяли долей (%) от поверхностной величины, определенной на глубине 0.5 м (табл. 2).

Для изучения влияния тайфуна “Гони” (2015 г.) на продукционные характеристики зал. Посыета полученные данные сравнивались с данными измерений, проведенных в тот же временной период (осенью) в 2014 г. на разрезе и суточных станциях, находящихся в близких координатах. Для получения параметров КХЛ, показателя поглощения света детритом и желтым веществом *adg*,

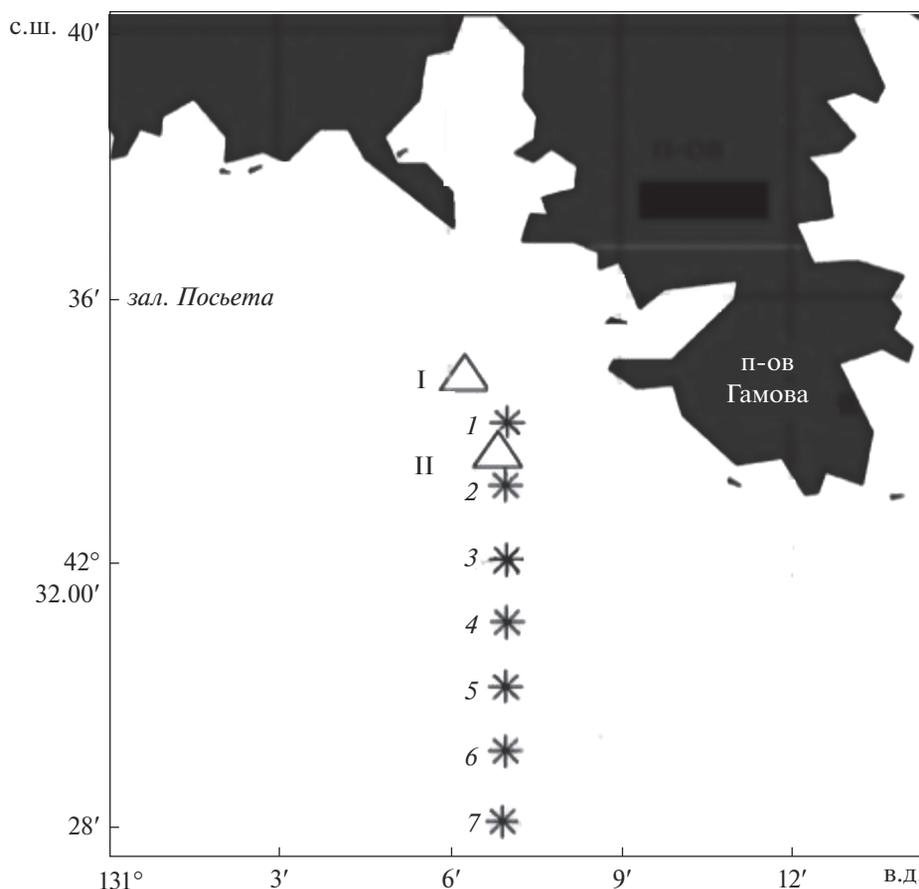


Рис. 1. Картограмма территории расположения суточных станций (Δ) и станций разреза (*).

изучения их пространственных распределений использовались спутниковые данные уровня 2 MODIS-Aqua для безоблачных ситуаций. Они получены авторами при обработке данных уровня 1. Данные уровня 1 получены в международном центре космических полетов им. Годдарда [30, 31]. Обработка данных выполнялась с использованием программного обеспечения SeaDAS версий 6.4 и 7.3. При генерации данных уровня 2 использовалась рекомендуемая для мутных прибрежных вод атмосферная коррекция MUMM (Management Unit of the North Sea Mathematical Models) [33]. Ее выполнение для шельфовых вод зал. Петра Великого проверено в работах [1, 19]. Параметр КХЛ при генерации данных уровня 2 для MODIS-Aqua рассчитывался по стандартной комбинации алгоритмов: ОСЗМ для КХЛ $> 0.2 \text{ мг/м}^3$ [32] и разработанного для КХЛ $< 0.15 \text{ мг/м}^3$ [26].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показано сравнение изучаемых параметров на станциях разреза в 2014 и 2015 гг. Более высокая T отмечалась на поверхности и в столбе воды в 2015 г. При этом в 2015 г. наблюдалось

уменьшение температурного диапазона между поверхностными и придонными водами на мелководных станциях приблизительно в два раза по сравнению с 2014 г. (разница T составила $\sim 5^\circ\text{C}$ против 10°C). Та же тенденция в разнице T сохранялась и для глубоководных станций разреза до глубины 50 м.

После прохождения тайфуна в поверхностных слоях вод на станциях разреза происходило распреснение. Наибольшее его проявление наблюдалось на станциях, расположенных ближе к берегу; S на поверхности станций 1–3 равнялась соответственно 27.31, 28.15, 27.95‰, тогда как в 2014 г. S на этих станциях – 33.0‰. При удалении станций разреза от берега в 2015 г. S в поверхностных горизонтах возрастала, достигая максимума (30.92‰) на последней мористой станции. С глубиной происходило монотонное уменьшение разницы средних значений S до глубины 30 м, где среднее значение S достигало 33.25‰. В отличие от съемки в 2014 г., где преимущественно наблюдалось по одному максимуму ФХЛ на глубине, в 2015 г. после прохождения тайфуна два выраженных максимума ФХЛ наблюдались на всех семи станциях разреза в приповерхностных (3–10 м) и

Таблица 1. Изменение S , ‰, на станциях разреза 2015 г. при прямом и обратном прохождении судна, (H – глубина измерения, м)

H , м	№ станций, время съемки, ч:мин												
	1 15:11	2 15:28	3 15:56	4 16:26	5 16:53	6 17:13	7 17:39	6 18:36	5 18:54	4 19:14	3 19:38	2 19:58	1 20:18
1	27.33	28.16	27.96	29.99	30.50	30.37	30.92	31.80	31.98	32.30	29.45	28.14	28.53
5	30.92	30.93	30.89	32.02	32.09	31.70	31.67	31.83	31.99	32.31	32.04	31.69	31.17
10	32.40	32.24	32.57	32.55	32.45	32.52	32.47	32.32	32.51	32.39	32.25	32.26	32.10
15	32.85	32.63	32.65	32.64	32.70	32.62	32.76	32.68	32.68	32.60	32.61	32.63	32.77
20	33.13	32.97	32.72	32.73	32.80	32.71	32.87	32.77	32.91	32.98	32.83	33.07	32.97
25	33.29	33.21	33.02	32.97	32.92	32.85	32.89	32.92	33.11	33.30	33.12	33.22	33.19
30	33.57	33.56	33.23	33.21	33.08	33.06	32.99	33.09	33.26	33.55	33.45	33.51	33.31
35	33.48	33.50	33.52	33.29	33.17	33.26	33.14	33.19	33.54	33.50	33.51	33.53	33.59
40	33.48	33.48	33.53	33.58	33.29	33.39	33.26	33.43	33.56	33.59	33.50	33.47	
45			33.52	33.47	33.40	33.57	33.28	33.56	33.39	33.46			
50				33.38	33.43	33.46	33.41	33.44	33.45				
55				33.50	33.51	33.47	33.52	33.50	33.55				
60					33.82	33.80	33.68	33.75					
65					33.96		33.85	33.98					
70							33.94						

заглубленных (25–30 м) горизонтах. На первых двух прибрежных станциях приповерхностные максимумы ФХЛ превышали значения заглубленных максимумов. На остальных станциях они были ниже заглубленных. На разрезе 2015 г., в отличие от съемки 2014 г., максимум значений ОРОВ был на поверхности, флуоресценция ОРОВ составила 13.56 мг/м³, снижаясь с глубиной. В 2014 г. максимумы фиксировались в придонных горизонтах на глубине ≤40 м. Концентрации ОРОВ выравнивались между двумя сравниваемыми станциями на глубине 26 м.

Для изучения кратковременной изменчивости гидробиологических характеристик применен обратный ход судна и выполнен повторный разрез от ст. 7 к ст. 1 (табл. 1). Из повторной съемки видно, что симметрично расположенные станции не повторяют профиль даже такого консервативного параметра, как S , что, вероятно, проявляет гидродинамические процессы, в том числе и внутреннего прилива [11].

Для лучшего понимания связи гидрологических и гидробиологических процессов и сглажи-

вания внутрисуточной изменчивости выполнены суточные станции. На рис. 3 представлено сравнение изучаемых параметров. При сравнении параметров станций 2014 и 2015 гг. выявлено следующее: среднесуточное значение T на поверхности суточных станций в оба года различалось на 1.4°C. При этом с глубиной значения T различались более существенно: на глубине 35.5 м в 2015 г. T была выше на 5.5°C, чем придонная T в 2014 г. (рис. 3а).

Как и на станциях разреза, на поверхностных горизонтах суточной станции в 2015 г. наблюдалось распреснение: по сравнению с 2014 г. среднесуточная S уменьшилась на 5.5‰ (рис. 3б). С глубиной происходило уменьшение разницы значений S , на глубине 11.5 м она составляла 1‰, на глубине 35.5 м, где показатели T отличались на 5.5°C, разница между показателями S составляла 0.2‰. В столбе воды на станции, подвергшейся воздействию тайфуна (2015 г.), наблюдалось два максимума ФХЛ. Первый максимум ФХЛ отмечен в поверхностных водах, концентрация пигмента составила 5.06 мкг/л. Второй максимум об-

Таблица 2. Изменчивость концентрации ОРОВ с глубиной в зависимости от ПП фитопланктона

Глубина, м	ФАР, % от поверхности	ФХЛ, мкг/л	Относительная величина ПП	S 2015 г., ‰	S 2014 г., ‰	Пресная вода, л	ОРОВ 2015 г., мкг/л	ОРОВ 2014 г., мкг/л	Разница ОРОВ 2014–2015 гг.	ОРОВ/л пресной воды × 100 мкг/л
0.5	100	5.06	5.06	27.24	33.03	177.89	13.56	1.02	12.54	7.05
1	84.16	5.15	5.15	27.25	33.05	178.0	13.09	0.52	12.57	7.06
1.5	61.08	4.91	4.91	27.45	33.05	171.87	11.12	0.39	10.73	6.24
2	48.73	4.62	4.62	27.66	33.06	165.78	9.90	0.38	9.52	5.74
2.5	39.44	4.23	4.23	27.91	33.05	157.86	8.66	0.36	8.30	5.25
3	31.90	3.83	3.83	28.24	33.06	147.71	7.65	0.35	7.30	4.94
3.5	26.17	3.45	3.45	28.62	33.06	136.39	6.79	0.36	6.43	4.71
4	21.7	3.08	3.08	28.98	33.06	125.46	5.94	0.36	5.58	4.44
4.5	18.20	2.72	2.72	29.33	33.07	114.74	5.17	0.35	4.82	4.20
5	15.47	2.41	2.41	29.72	33.08	103.26	4.55	0.34	4.21	4.08
5.5	13.32	2.15	2.15	30.10	33.08	91.49	4.00	0.32	3.68	4.02
6	11.73	1.93	1.93	30.43	33.09	81.50	3.51	0.31	3.20	3.93
6.5	10.52	1.75	1.75	30.71	33.09	73.15	2.99	0.29	2.70	3.69
7	9.54	1.59	1.59	30.94	33.09	66.13	2.56	0.28	2.28	3.45
7.5	8.71	1.45	1.45	31.14	33.09	60.10	2.21	0.27	1.94	3.21
8	8.01	1.34	1.34	31.32	33.10	54.53	1.93	0.27	1.66	3.04
8.5	7.41	1.26	1.26	31.48	33.10	49.74	1.69	0.25	1.44	2.89
9	6.89	1.20	1.20	31.62	33.11	45.64	1.49	0.24	1.25	2.74
9.5	6.43	1.15	1.15	31.74	33.11	42.14	1.29	0.23	1.06	2.52
10	6.00	1.09	1.09	31.84	33.11	39.00	1.09	0.21	0.88	2.25
10.5	5.63	1.04	1.04	31.94	33.11	36.06	0.96	0.20	0.76	2.10
11	5.28	1.00	1.00	32.02	33.12	33.57	0.85	0.19	0.66	1.96
11.5	4.97	0.95	0.95	32.09	33.12	31.67	0.74	0.18	0.56	1.75
12	4.68	0.90	0.94	32.16	33.13	29.68	0.66	0.18	0.48	1.62
12.5	4.41	0.88	0.89	32.23	33.13	27.69	0.61	0.18	0.43	1.55
13	4.16	0.86	0.84	32.29	33.14	25.87	0.56	0.18	0.39	1.49
13.5	3.93	0.84	0.79	32.35	33.14	24.28	0.53	0.17	0.35	1.46
14	3.72	0.82	0.75	32.40	33.15	22.90	0.50	0.17	0.33	1.44
14.5	3.53	0.81	0.71	32.45	33.16	21.73	0.48	0.17	0.31	1.43
15	3.36	0.81	0.68	32.49	33.16	20.77	0.46	0.17	0.29	1.42
15.5	3.11	0.80	0.62	32.52	33.18	20.00	0.44	0.16	0.27	1.37
16	2.95	0.79	0.59	32.55	33.19	19.45	0.41	0.16	0.25	1.29
16.5	2.82	0.78	0.57	32.59	33.20	18.87	0.39	0.17	0.23	1.21
17	2.69	0.77	0.54	32.61	33.21	18.27	0.38	0.17	0.21	1.15
17.5	2.58	0.77	0.52	32.64	33.22	17.62	0.38	0.19	0.19	1.08
18	2.46	0.77	0.50	32.67	33.23	17.07	0.37	0.19	0.18	1.03
18.5	2.35	0.77	0.47	32.70	33.23	16.49	0.36	0.20	0.17	1.03
19	2.25	0.77	0.45	32.73	33.24	15.82	0.36	0.19	0.17	1.06
19.5	2.16	0.77	0.43	32.76	33.25	15.05	0.37	0.20	0.17	1.13
20	2.07	0.77	0.42	32.78	33.25	14.20	0.38	0.20	0.18	1.27
20.5	1.87	0.78	0.38	32.81	33.24	13.25	0.40	0.21	0.19	1.37
21	1.76	0.80	0.35	32.83	33.24	12.47	0.42	0.23	0.19	1.52
21.5	1.69	0.83	0.34	32.86	33.24	11.79	0.44	0.25	0.19	1.62
22	1.59	0.85	0.32	32.88	33.24	11.15	0.45	0.26	0.19	1.70
22.5	1.51	0.87	0.30	32.89	33.24	10.61	0.47	0.28	0.19	1.76
23	1.45	0.88	0.29	32.91	33.24	10.00	0.48	0.30	0.18	1.78
23.5	1.36	0.90	0.27	32.93	33.24	9.37	0.49	0.33	0.16	1.70
24	1.28	0.93	0.26	32.95	33.24	8.67	0.50	0.37	0.13	1.51
24.5	1.23	0.95	0.25	32.98	33.23	7.86	0.52	0.42	0.10	1.29

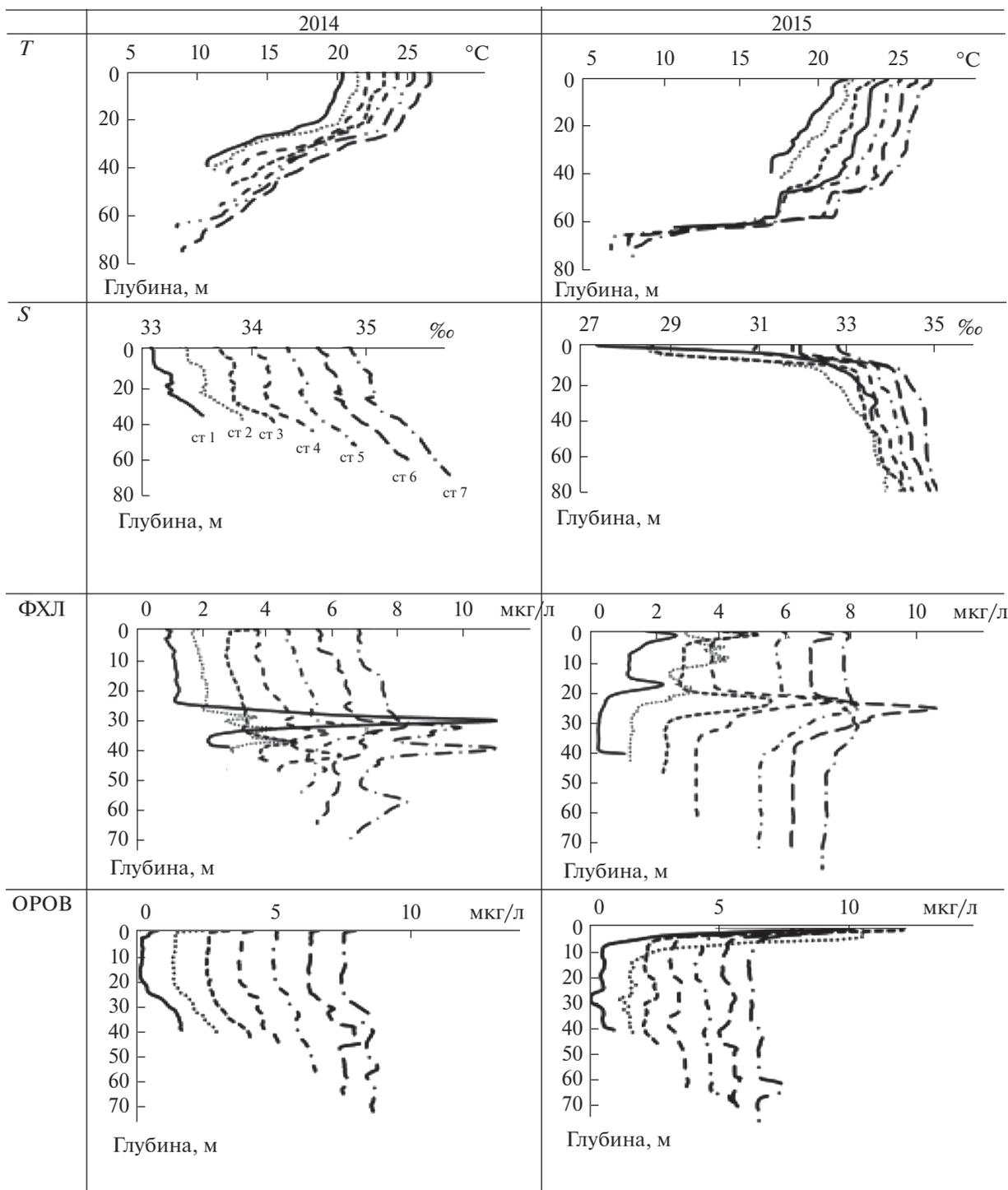


Рис. 2. Пространственное распределение основных гидрологических и гидробиологических параметров на станциях гидрологического разреза в 2014 и 2015 гг. *T*, °C – температура для разделения профилей станций к значению каждой последующей прибавляется 1°C; *S*, ‰ – соленость, к значению каждой последующей станции прибавляется по 0.3‰; ФХЛ, мкг/л – к значению каждой последующей станции прибавляется по 1 мкг/л; ОРОВ, мкг/л – к значению каждой последующей станции прибавляется 1 мкг/л.

наружен на глубине 25 м (0.97 мкг/л). В 2014 г. ФХЛ на поверхности была равна 1.03 мкг/л, а максимум был на глубине 28.5 м и составлял

2.75 мкг/л (рис. 3в). По аналогии с ФХЛ на поверхности станции после прохождения тайфуна ФХЛ ОРОВ была увеличена в 13 раз по сравнению

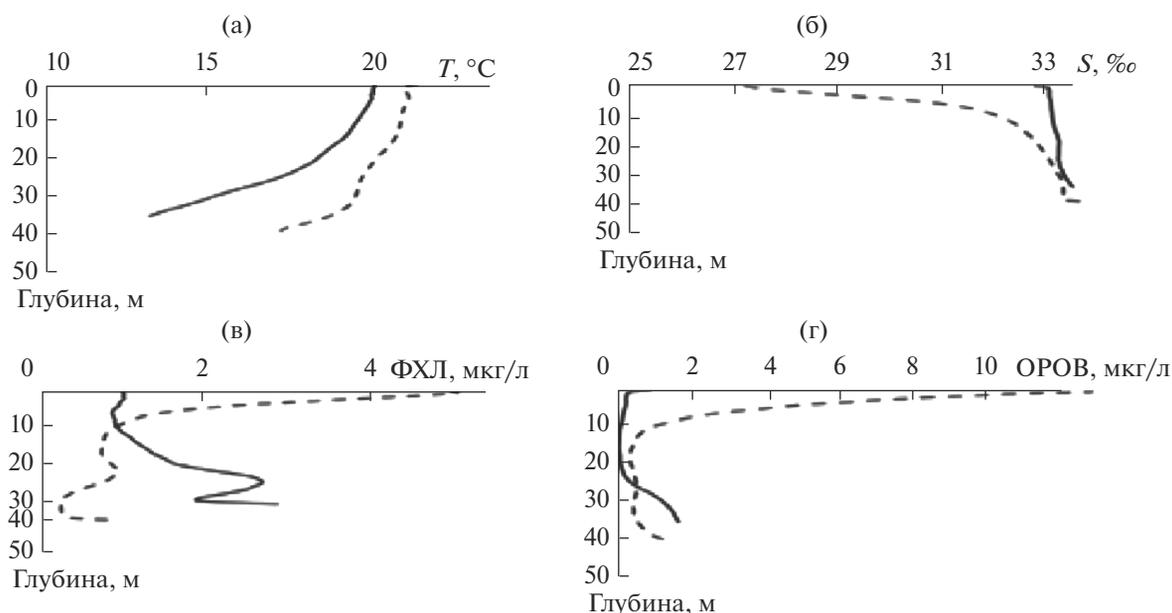


Рис. 3. Сравнение профилей распределения с глубиной среднесуточных значений на станциях, выполненных 06.09.2014–07.09.2014 (сплошная линия) и 05.09.2015–06.09.2015 (прерывистая линия). а – температура T ; б – соленость S ; в – ФХЛ; г – флуоресценция ОРОВ.

с 2014 г. (рис. 3г). На глубине 26–26.5 м концентрации ОРОВ в разные годы становились близкими.

Для оценки влияния материкового стока на концентрацию фитопланктона, величину ПП и концентрацию ОРОВ подсчитано поступление пресной воды в различных горизонтах суточной станции 2015 г. Объем поступивших в море пресных вод в пересчете на 1 м^3 прибрежных морских вод легко вычислить: разница солености ($\%$) между двумя сравниваемыми годами, умноженная на 30.686 л (выведено эмпирически из расчета S прибрежной морской воды – 33‰, дождевой воды – 0‰). Подсчитано количество ОРОВ, поступившее в 1 л пресной воды (табл. 2). Для этого разницы значений этого параметра в 2014 и 2015 гг. разделили на количество поступившей воды. Обнаружено, что в перемешанном слое морской воды концентрация ОРОВ на единицу объема поступившей пресной воды снижается с глубиной и достигает минимальных значений на глубине 18 м (табл. 2; рис. 3г). При этом в придонных водах флуоресценция ОРОВ возрастает, что, очевидно, связано с деградацией отмерших осевших гидробионтов. Поэтому для изучения влияния ПП на концентрацию ОРОВ рассмотрен диапазон глубин, где не проявляется влияние придонного ОРОВ. Для изучения феномена увеличения концентрации ОРОВ от глубинных горизонтов к поверхности проведена оценка изменения величины ПП. Относительная величина ПП рассчитывалась умножением величины ФХЛ на ФАР, измеренную в 2015 г. в интервале от поверхности до глубины эвфотической зоны, где она равна 1%

поверхностной ФАР [6, 8]. Считалось, что в этом слое при ФАР $> 5\%$ поверхностной ФАР (интенсивность света, при которой фотосинтез насыщается) ПП прямо пропорциональна КХЛ [37]. При $1\% < \text{ФАР} < 5\%$ (1% поверхностной освещенности – точка компенсации, когда фотосинтез компенсирует дыхание водорослей [15]) ПП пропорциональна не только КХЛ, но и величине ФАР в указанном интервале. При сравнении относительной ПП и разницы ОРОВ в годы с тайфуном и без него (фактический прирост ОРОВ после тайфуна) была обнаружена высокая корреляция между ПП и приростом ОРОВ в эвфотической зоне (0.971). Показатель, характеризующий связь общего содержания хлорофилла a с интенсивностью фотосинтеза – ассимиляционное число (АЧ) был равен 4 мгС/ч мгХЛ в год без тайфуна и 8 мгС/ч мгХЛ неделю спустя после прохождения “Гони”. Через месяц после воздействия тайфуна АЧ снижалось до 5 мгС/ч мгХЛ.

На рис. 4 показано распределение КХЛ и показателя поглощения света детритом и желтым веществом adg в 2014 и в 2015 гг.

Типичные значения КХЛ на разрезе, выполненном в 2014 г., варьировали в диапазоне 0.5–1.0 мкг/л. Близкие значения этих параметров отмечались на рис. 4а. Значения adg изменялись от 0.01 до 0.05 м^{-1} . Спутниковые снимки, выполненные примерно в это же время в 2015 г. после прохождения тайфуна, показывают разительные изменения КХЛ и adg . Максимальные значения КХЛ на разрезе выросли по сравнению с 2014 г. до

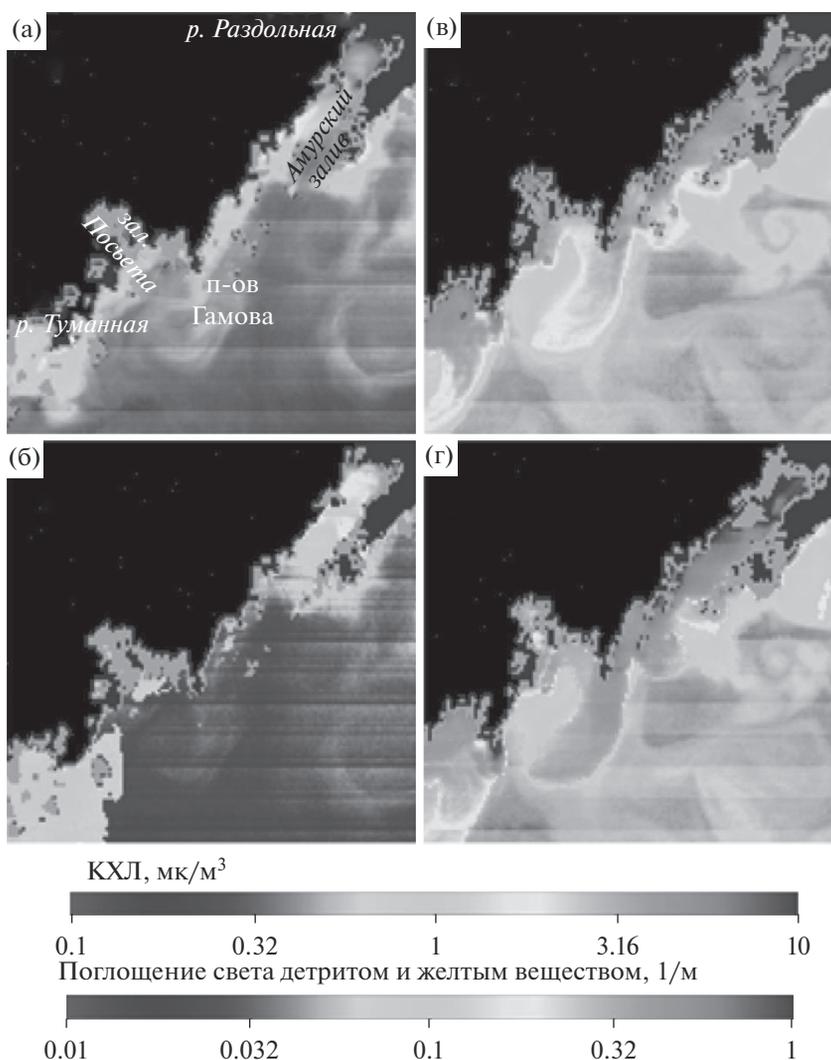


Рис. 4. Распределение КХЛ (а, в) и поглощение света детритом и желтым веществом adg (б, г) в западной части зал. Петра Великого в осенний период в 2014 г. (а, б) без прохождения тайфуна и в 2015 г. (в, г) после прохождения тайфуна “Гони.”

0.7–3.4 mg/m^3 (рис. 4в). Значения adg также выросли на порядок – до 0.1–0.4 m^{-1} . Обращает на себя внимание тот факт, что значения КХЛ и adg после прохождения тайфуна в прибрежных водах становятся равными значениям в эстуариях рек, в частности рек Раздольной и Туманной в год без тайфуна (рис. 4). На рис. 4в отображено распределение КХЛ после тайфуна. Ясно различимы 2 “языка” выноса вод с континента, один начинается с устья р. Туманной, второй – от п-ова Гамова. Эти “языки” выноса имеют ширину до 20 миль и распространяются на расстоянии ~50 миль от берега. На границах “языков” КХЛ в 2–4 раза превышает значения в окружающих водах. Такой же контраст наблюдается и для adg . Величина adg меняется на границе “языков” выноса

у п-ова Гамова от 0.05 до 0.3 m^{-1} , в устье р. Туманной – от 0.03 до 0.1 m^{-1} в окружающих водах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Действие тайфунов на шельфе сводится в основном к трем событиям: ветровому перемешиванию вод, материковому стоку и ресуспендированию осадков, что в конечном итоге приводит к повышению ПП [22, 23, 35]. Перемешивание вод под действием тайфуна при настоящих наблюдениях приводило к уменьшению разницы между поверхностной и придонной T . При этом полного смешивания вод на шельфе не происходило. Вероятно, это связано с недостаточной для этого интенсивностью ветра и со временем прохождения тайфуна. Выпадение большого количества осадков во время тайфуна сопровождалось рас-

преснением прибрежных вод; с удалением от берега S возрастала. Та же тенденция наблюдалась и с глубиной. Можно полагать, что распреснение прибрежных вод происходило в основном за счет материкового стока.

Снижение показателя S в 2015 г. хорошо коррелировало с увеличением величины ФХЛ. Численное значение коэффициента корреляции между ФХЛ и S на суточной станции было высоким и отрицательным (-0.973). Это подтверждает вывод о том, что распресненные прибрежные воды были обогащены биогенными элементами, принесенными с суши, что способствовало росту фитопланктона и производству ПП. Среднесуточные показатели ФХЛ в поверхностных водах станции в 2015 г. увеличились в 5 раз по сравнению с этим же параметром, измеренным в 2014 г. (без тайфуна); соответственно, АЧ увеличилось в 2 раза. На разрезе наблюдалась более сложная картина: при удалении от берега значения ФХЛ уменьшались, что связано, вероятно, с приливно-отливными течениями [11]. Кроме того, что системы области шельфа очень динамичны, они также показывают большую пространственную и временную изменчивость: влияние тайфуна может различаться в зависимости от мест расположения станций [35]. Измерение S по обратному ходу судна показало, что экосистема находилась в более неустойчивом состоянии, чем в обычное время года.

Наибольших изменений по сравнению с показателями 2014 г. достигал показатель ФХЛ ОРОВ, он увеличился более чем в 10 раз. Несомненно, какая-то часть органического вещества поступила с материковыми стоками, но проведенное исследование показало, что образование большей части ОРОВ в морской воде связано с автохтонными процессами. Известно, что природный фитопланктон прижизненно экскретирует в среду РОВ до 50–80% включенного при фотосинтезе углерода, что является функцией здоровых клеток [13, 16]. При анализе последствий прохождения тайфуна над континентальным шельфом Восточно-Китайского моря также было отмечено, что скорость высвобождения РОВ из активно растущего фитопланктона возрастает [22]. Между величиной фактического прироста ОРОВ в 2015 г. (в сравнении с 2014 г.) и величиной относительной ПП выявлена высокая положительная корреляция. Это дает основание утверждать, что повышение интенсивности фотосинтетических процессов в прибрежных водах вследствие привнесения с материковыми стоками биогенов влечет за собой увеличение образования РОВ. Кроме того, в [22] показано, что сильное перемешивание толщи воды, вызванное тайфуном, может серьезно повредить клетки водорослей и другие хрупкие планктонные организмы, что также может привести к накоплению лабильного орга-

нического вещества в толще воды. Ресуспендирования осадков авторами статьи не отмечено. Небольшое возрастание концентрации ОРОВ у дна, вероятно, связано с взмучиванием их зондом.

По спутниковым данным оценено влияние тайфуна на большей акватории, чем по данным, полученным с борта судна. Судовые и спутниковые данные проведенных экспериментов показали относительное совпадение по гидробиологическим параметрам.

ВЫВОДЫ

С привлечением различных методов исследования данная работа позволила выявить метеорологическое воздействие тайфуна силой ветра и обильными осадками на прибрежные экосистемы в зоне континентального шельфа. Хорошее перемешивание прибрежных вод привело к уменьшению градиента температуры в диапазоне глубин от 0 до 50 м. Благодаря использованию данных суточных наблюдений обнаружена высокая положительная связь между КХЛ и количеством пресных вод с континента и установлено, что образование ОРОВ определяется преимущественно автохтонными процессами. Дистанционные измерения позволили обнаружить изменения экосистемы на больших акваториях. Показано, что эти изменения в результате действия тайфуна “Гони” приближают состояние прибрежной зоны к состоянию эстуариев рек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александров А.И., Качур В.А.* Особенности атмосферной коррекции спутниковых данных цвета океана в Дальневосточном регионе // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 56–67.
2. *Астахов А.С., Дарьин А.В., Калугин И.А., Аксентов К.И.* Реконструкция частоты катастрофических наводнений на западном побережье Японского моря по шельфовым седиментационным записям // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 91–102.
3. *Горшкова О.М., Панаева С.В., Федосеева Е.В.* Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды // Вода: химия и экология. 2009. № 11. С. 31–37.
4. ГОСТ 17.1.04.02-90 Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла. М.: Изд-во стандартов Госкомприроды, 1990.
5. *Джонсон Н., Лион Ф.* Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1980. 610 с.
6. *Захарков С.П., Штрайхерт Е.А., Гордейчук Т.Н., Ванин Н.С.* Первичная продукция западной части Охотского моря в весенний период // Исследования морских экосистем и биоресурсов / Отв. ред. В.П. Челомин. М.: Наука, 2007. 699 с.
7. *Захарков С.П., Владимиров А.С., Штрайхерт Е.А., Ши С., Гладких Р.В., Бузолёва Л.С.* Продукционные

- характеристики бактерий и фитопланктона в весенне-летний период в Охотском и Беринговом морях // Микробиология. 2017. Т. 86. № 3. С. 364–372.
8. *Звалинский В.И., Лобанов В.Б., Захарков С.П., Тищенко П.Я.* Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Японского моря осенью 2000 г. // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 1. С. 135–145.
 9. *Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И.* Продукция морских сообществ // Первичная продукция. Биология океана. 1977. Т. 2. Биологическая продуктивность океана. М.: Наука, С. 183–209.
 10. *Мордасова Н.В.* Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // *Тр. ВНИРО*. 2014. Т. 152. С. 41–56.
 11. *Новотрясов В.В., Захарков С.П., Степанов Д.В.* Осенний внутренний прилив в прибрежной зоне Японского моря // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 8. С. 64–69.
 12. *Пермяков М.С., Акмайкин Д.А., Салюк П.А., Бужин О.А., Тархова Т.И., Смолин П.В.* Влияние тайфунов на поля концентрации хлорофилла “а” по данным сканера цвета морской воды SeaWiFS // *Исслед. Земли из космоса*. 2005. № 5. С. 56–62.
 13. *Пропп Л.Н.* Роль витамина В₁₂ в сукцессии морских фитоценозов // *Изв. ТИНРО*. 2009. Т. 158. С. 228–246.
 14. *Пугач С.П., Пипко И.И.* Динамика растворенного окрашенного органического вещества на шельфе Восточно-Сибирского моря // *ДАН*. 2012. Т. 447. № 6. С. 671–674.
 15. *Раймонт Д.* Планктон и пищевая продуктивность океана. Т. 1. Фитопланктон. М.: Легкая и пищевая пром-ть, 1983. 568 с.
 16. *Садчиков А.П.* Экскреция органического вещества фитопланктоном в природных водоемах // *Материалы по флоре и фауне Республики Башкортостан*. Науч. журн. Вып. XIX (июнь). Уфа: РИЦ БашГУ, 2018. С. 132–135.
 17. *Салюк П.А., Стёпочкин И.Е., Алексанин А.И., Голлик И.А.* Анализ воздействия тропических циклонов на поля концентрации хлорофилла-а в Северо-Западной части Тихого океана в 1979–1986 и 1996–2010 гг. с использованием данных пассивного спутникового зондирования цвета океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 2. С. 219–227.
 18. *Хаин А.П., Сутырин Г.Г.* Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 272 с.
 19. *Штрайхерт Е.А., Захарков С.П.* О пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-а на шельфе залива Петра Великого при зимне-весеннем цветении фитопланктона по спутниковым и подспутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 173–186.
 20. *Шумилин Е.Н., Горячев Н.А., Касаткина А.П., Захарков С.П., Орлова Т.Ю.* Микроэлементы в sestone морской части эстуария реки Раздольной в период “красного прилива” // *Биология моря*. 1994. Т. 20. № 4. С. 286–290.
 21. *Babin S.M., Carton J.A., Dickey T.D., Wiegert J.D.* Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. C03043. <https://doi.org/10.1029/2003JC001938>
 22. *Chang J., Chung C.C., Gong G.C.* Influences of cyclones on chlorophyll-a concentration and *Synechococcus* abundance in a subtropical western Pacific coastal ecosystem // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1996. V. 140. P. 199–205.
 23. *Chen C.-T. A., Liu C.-T., Chuang W.S., Yang Y.J., Shiah F.-K., Tang T.Y., Chung S.W.* Enhanced buoyancy and hence upwelling of subsurface Kuroshio waters after a typhoon in the southern East China Sea // *J. Marine Systems*. 2003. V. 42. P. 65–79.
 24. *Fogel M.L., Aguilar K., Cuhel R., Hollander D.J., Willey J.D., Paerl H.W.* Biological and isotopic changes in coastal waters induced by Hurricane Gordon // *Limnol. Oceanogr.* 1999. V. 44. № 6. P. 1359–1369.
 25. *Gilbes F., Armstrong R.A., Webb R.M.T., Müller-Karger F.E.* SeaWiFS helps assess hurricane impact on phytoplankton in Caribbean Sea // *EOS, Transactions, Am. Geophys. Union*. 2001. V. 82. P. 529–533.
 26. *Hu C., Lee Z., Franz B.* Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference // *J. Geophys. Res.* 2012. № 117(C1). P. 1–25. <https://doi.org/10.1029/2011jc007395>
 27. *Huang L., Zhao H., Pan J., Devlin A.* Remote sensing observations of phytoplankton increases triggered by successive typhoons // *Earth Sci.* 2017. V. 11. № 4. P. 601–608. <https://doi.org/10.1007/s11707-016-0608-x>
 28. *Lin I.I.* Typhoon-induced phytoplankton blooms and primary productivity increase in the western North Pacific subtropical ocean // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C03039. P. 1–15. <https://doi.org/10.1029/2011JC007626>
 29. *Martin P., Lampitt R.S., Perry M.J., Sanders R., Lee C., D’Asaro E.* Export and mesopelagic particle flux during a North Atlantic spring diatom bloom // *Deep-Sea Res I*. 2011. V. 58. P. 338–349.
 30. NASA Goddard Space Flight Center. Ocean Ecology Laboratory. Ocean Biology Processing Group. MODIS Aqua Inherent Optical Properties Data. 2018 Reprocessing. Greenbelt: NASA OB. DAAC, 2018. Accessed on 08/20/2020. <https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/L2/IOP/2018>
 31. NASA Goddard Space Flight Center. Ocean Ecology Laboratory. Ocean Biology Processing Group. MODIS Aqua Ocean Color Data. 2018 Reprocessing. Greenbelt: NASA OB. DAAC, 2018. <https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018>
 32. *O’Reilly J.E., Maritorena S., O’Brien M.C. et al.* SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2000 год. 49 p.
 33. *Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M.* Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. № 6. P. 897–912.
 34. *Salyuk P.A., Bukin O.A., Alexanin A.I. et al.* Optical properties of Peter the Great Bay waters compared with

- satellite ocean colour data // *Int. J. Remote Sensing*. 2010. V. 31. № 17, 18. P. 4651–4664.
35. *Shiah F-K., Chung S-W., Kao S-J., Gong G-C., Liu K-K.* Biological and hydrographical responses to tropical cyclones (typhoons) in the continental shelf of the Taiwan Strait // *Cont. Shelf Res.* 2000. V. 20. P. 2029–2044.
36. *Son S.H., Platt T., Bouman H., Lee D.K., Sathyendranath S.* Satellite observation of chlorophyll and nutrients increase induced by Typhoon Megi in the Japan/East Sea // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L05607.
<https://doi.org/10.1029/2005GL025065>
37. *Talling J.F.* Photosynthetic characteristics of some freshwater plankton diatoms in relation to underwater radiation // *New Phytol.* 1957. V. 56. P. 29–50.