

УДК 551.464:543.319

Т.А. Михайлик, А.П. Недашковский, Н.Д. Ходоренко, П.Я. Тищенко*
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

ОСОБЕННОСТИ ЭВТРОФИКАЦИИ АМУРСКОГО ЗАЛИВА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ) РЕКОЙ РАЗДОЛЬНОЙ

Приведены результаты внутригодовых изменений концентраций растворенного органического углерода, неорганических форм биогенных веществ — фосфор, сумма концентраций аммония, нитритов, нитратов и кремний — в р. Раздольной. Измерения проводились, как правило, каждые две недели в течение года в 2013–2014 гг. Показано, что муссонный климат создает импульсный характер потоков биогенных веществ в Амурский залив р. Раздольной, что способствует созданию «избыточной» биомассы фитопланктона. Годовые потоки биогенных веществ и растворенного органического углерода, поставляемые р. Раздольной в залив, существенно больше в сравнении с канализационными стоками г. Владивосток. Установлена межгодовая неравномерность этих потоков. Наши наблюдения позволили оценивать концентрации биогенных веществ в зависимости от расхода воды и, используя наблюдения УГМС за период 2003–2017 гг., оценить тенденцию потоков: наблюдается систематическое увеличение годовых потоков биогенных веществ и растворенного органического углерода, обусловленное ростом годового речного стока.

Ключевые слова: река Раздольная, Амурский залив, эвтрофикация, гидрохимия, потоки биогенных веществ.

DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-401-411.

Mikhaylik T.A., Nedashkovsky A.P., Khodorenko N.D., Tishchenko P.Ya. Peculiarities of the eutrophication of the Amur Bay (Japan Sea) by Razdolnaya River // Izv. TINRO. — 2020. — Vol. 200, Iss. 2. — P. 401–411.

Data on dissolved organic concentration (DOC) and concentration of nutrients (phosphorus, silicon, and nitrogen of ammonium, nitrite and nitrate) in the Razdolnaya/Suifen River water are presented. The samples were collected fortnightly, as a rule, during more than a year (2013–2014). The nutrients concentration decreased and DOC and humic substances concentration increased with the river run-off increasing. In conditions of monsoon climate,

* Михайлик Татьяна Александровна, научный сотрудник, e-mail: tatyana.mikhaylik.00@mail.ru; Недашковский Александр Павлович, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: nealpa@mail.ru; Ходоренко Наталья Дмитриевна, научный сотрудник, e-mail: natahod@poi.dvo.ru; Тищенко Павел Яковлевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией, e-mail: tpavel@poi.dvo.ru.

Mikhaylik Tatyana A., researcher, Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: tatyana.mikhaylik.00@mail.ru; Nedashkovsky Alexander P., Ph.D., leading researcher, Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: nealpa@mail.ru; Khodorenko Nataliya D., researcher, Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: natahod@poi.dvo.ru; Tishchenko Pavel Ya., D.Chem., head of laboratory, Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: tpavel@poi.dvo.ru.

the nutrients discharge from the Razdolnaya/Suifen into the Amur Bay had great pulsations that promoted sometimes producing of «excessive» phytoplankton biomass in the bay and provided a background for hypoxia at the bottom. Natural terrestrial fluxes of nutrients and DOC into the bay are much higher than these substances supply with waste waters of Vladivostok City. Interannual variability of the nutrients and dissolved organics fluxes into the Amur Bay is traced. Tendency to their increasing is supposed since 2003 because of the Razdolnaya/Suifen River annual discharge increasing observed by Hydrometeorological Agency in 2003–2017.

Key words: Razdolnaya River, Suifen River, Amur Bay, eutrophication, marine chemistry, nutrient flux.

Введение

В настоящее время опубликовано много фактического материала, доказывающего, что в Мировом океане происходят глобальные изменения [Riedel et al., 2016]. К таким изменениям относятся уменьшение концентрации кислорода (деоксигенация) и уменьшение pH (ацидификация). Эти глобальные изменения затрагивают как прибрежные воды [Doney, 2010; Cai et al., 2011], так и открытую часть Мирового океана [Dore et al., 2009; Schmodtko et al., 2017; Breitburg et al., 2018]. Большинство исследователей связывают эти изменения с глобальным потеплением, изменениями в химическом составе атмосферы и эвтрофикацией (обогащение биогенными веществами) прибрежных вод.

В августе 2007 г. в Амурском заливе была обнаружена обширная площадь придонных вод (около 70 км²) в состоянии гипоксии [Тищенко и др., 2008; Тищенко, 2013]. Дальнейшие исследования показали сезонный характер этого явления [Тищенко и др., 2011; Тищенко, 2013]. Формирование гипоксии Амурского залива сопровождалось образованием гидрохимических аномалий в придонном слое вод (низкие значения pH, высокие концентрации ионов аммония, анионов фосфорной кислоты, растворенного неорганического углерода и кремния). На основании полученных результатов был сделан вывод, что причиной формирования гипоксии было бактериальное разложение «избыточной» биомассы фитопланктона (диатомей) на дне залива при отсутствии фотосинтетически активной радиации (ФАР) [Тищенко и др., 2011; Тищенко, 2013]. «Избыточная» биомасса фитопланктона образовывалась в результате эвтрофикации вод Амурского залива. На наш взгляд, существуют три основных источника обогащения поверхностных вод Амурского залива биогенными веществами, которые способны вызывать «цветение» фитопланктона, — канализационные стоки г. Владивосток, которым уделяется большое внимание в литературе [Огородникова, 2001; Нигматулина, 2005]; береговой сток и стоки рек, впадающих в залив. Главная река, впадающая в залив, — Раздольная. Ранее на 8 станциях для 4 сезонов измерялась концентрация биогенных веществ (БВ) в реке от с. Полтавка до с. Раздольное [Михайлик и др., 2011].

В данной работе нами публикуются результаты измерений концентраций неорганических форм БВ и растворенного органического углерода (РОУ), которые проводились, как правило, каждые две недели в течение года. Результаты обсуждаются с точки зрения влияния стока р. Раздольной на экосистему Амурского залива за период 2003–2017 гг.

Материалы и методы

Река Раздольная (Суйфун) начинается на территории Китая (северная Маньчжурия), входит в пределы РФ вблизи с. Полтавка и впадает в северную часть Амурского залива (рис. 1). Площадь водосбора р. Раздольной 16830 км², на территории России 7300 км², протяженность реки на российском участке равна 192 км. При среднемноголетнем расходе воды, равном 76 м³/с в районе ближайшего к устью поста (с. Тереховка, рис. 1), соответствующий среднегодовой объем водного стока будет составлять 2,4 км³*. Для водного режима р. Раздольной выделяется период весеннего половодья, который приходится на апрель–май, а также дождевые паводки в летние месяцы вследствие муссонного климата

* Атлас Приморского края. Владивосток: Дальпресс, 1998. 48 с.



Рис. 1. Карта-схема расположения р. Раздольной на территории РФ. Отбор проб на гидрохимический состав воды проводился у с. Раздольное

Fig. 1. Scheme of the Razdolnaya/Suifen River within Russia. Water samples were collected at Razdolnoye village

[Гайко, 2005]. Для изучения межгодового влияния р. Раздольной на акваторию Амурского залива были использованы данные Приморского УГМС по расходу воды у гидрологического поста с. Тереховка (60 км от устья реки), взятые с сайта <https://gmvo.skniivh.ru/>.

Перед отбором проб проводилось зондирование с помощью зонда RBR-620XR, помимо электропроводности и температуры измерялась мутность в единицах Normalized Turbidity Unit (NTU). Пробы воды отбирали у с. Раздольное (40 км от устья реки). Отбор проб проводился 5-литровым батометром Нискина два раза в месяц в период с марта 2013 по апрель 2014 г. В пробах определялись концентрации главных БВ (силикаты, фосфаты, нитраты, нитриты, аммоний), РОУ и гумусового вещества (ГВ). Образцы воды в тот же день доставлялись в лабораторию, где проводился их анализ.

Пробы воды на анализ РОУ предварительно фильтровались через стеклянный фильтр с размером пор 0,6 мкм. Анализ проводился на автоанализаторе модели TOC-VCPN фирмы «Shimadzu» в два этапа. На первом этапе автосемплером аликвота воды подавалась в реакционную трубку, где на катализаторе при температуре 680 °С в присутствии кислорода происходило превращение органических и неорганических форм углерода в двуокись углерода. Продукты сгорания с газом-носителем (очищенный от CO₂ воздух) поступали в осушитель, в ловушку галогенов, а затем в измерительную кювету ИК-анализатора. На втором этапе в пробе анализировалась только неорганическая форма углерода. Проба воды в дозаторе анализатора подкислялась соляной кислотой до pH 2. Неорганические формы углерода превращались в двуокись углерода, которая газом-носителем подавалась в кювету ИК-анализатора. Величина РОУ рассчитывалась по разнице между общим содержанием углерода и неорганической формой углерода. Содержание ГВ определяли спектрофотометрическим методом при длине волны

254 нм на спектрофотометре Shimadzu UV, модели UV-1650PC. Ошибка данного метода оценивалась нами в 2 % [Тищенко и др., 2006]. Методики остальных видов анализа можно найти в литературе*.

Суточный поток J_i растворенного вещества i , поставляемого рекой в Амурский залив, непосредственно рассчитывается по уравнению

$$J_i = Q \cdot C_i, \quad (1)$$

где C_i — концентрация растворенного вещества в речной воде; Q — расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$.

Результаты и их обсуждение

Антропогенные и естественные источники БВ увеличивают их концентрацию в речных водах, а атмосферные осадки (дождь) — уменьшают. По этой причине результаты измерений БВ и РОУ представлены как зависимость концентраций от расхода воды (рис. 2). Концентрация DIN (dissolved inorganic nitrogen) — это сумма концентраций нитритов, нитратов и ионов аммония. На рис. 2 видно, что концентрации БВ действительно имеют тенденцию к уменьшению с увеличением расхода воды, однако строгой

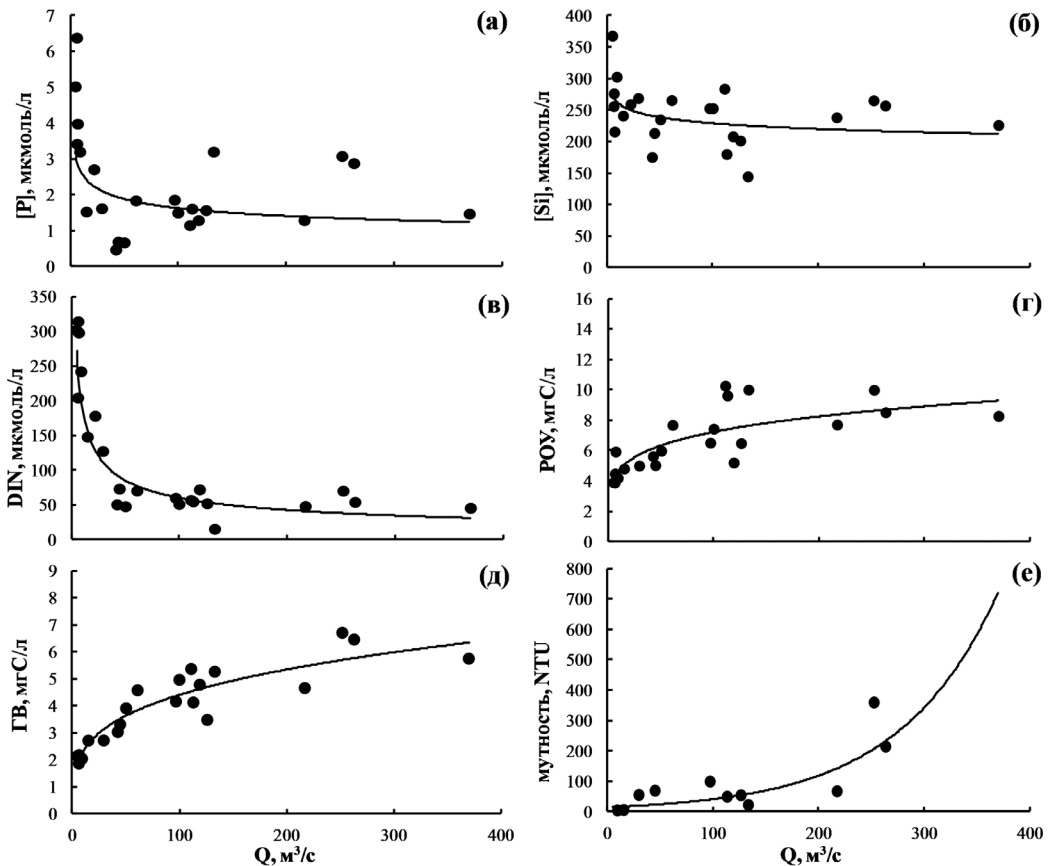


Рис. 2. Зависимость концентраций биогенных веществ (а — фосфора, б — кремния, в — DIN), растворенного органического углерода (г), гумусовых веществ (д) и мутности (е) в р. Раздольной от расхода воды. Линии на рисунке соответствуют концентрациям, рассчитанным по эмпирическому соотношению (2), за исключением аппроксимации «мутность», которая подчинялась экспоненциальному закону

Fig. 2. Dependence of nutrients concentrations (DIP — а, DISi — б, DIN — в), DOC (г), humic substances content (д), and turbidity (е) in the Razdolnaya water on the river discharge. Data of measurements are approximated with the empirical relationship (2) or exponential function (for turbidity)

* Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. М.: ВНИРО, 1988. 120 с.

функциональной зависимости нет. Противоположная тенденция наблюдается для РОУ, ГВ и мутности. Концентрации растворенного органического углерода и гумусового вещества увеличиваются с увеличением расхода воды (рис. 2). Следует отметить, что их зависимости от расхода воды очень похожи, хотя эти параметры измерялись разными приборами. Растворенное ГВ является частью общей концентрации РОУ. Отличие состоит в том, что абсолютные концентрации ГВ составляют примерно 50 % концентраций РОУ при малом расходе воды, а при большом расходе воды доля ГВ в РОУ возрастает до 75 %. Как и следовало ожидать, мутность воды возрастает с увеличением расхода воды. Зависимость мутности от расхода воды имеет экспоненциальный характер.

Методом наименьших квадратов концентрации БВ были аппроксимированы соотношением вида

$$C_i = a_i \cdot Q^{b_i}, \quad (2)$$

где a_i и b_i — эмпирические коэффициенты: $a_{[P]} = 4,266$, $b_{[P]} = -0,21$; $a_{[Si]} = 299,8$, $b_{[Si]} = -0,059$; $a_{DIN} = 604,2$, $b_{DIN} = -0,502$; $a_{POY} = 2,988$, $b_{POY} = 0,191$; $a_{ГВ} = 1,217$, $b_{ГВ} = 0,279$. Приведенные выше константы позволяют оценить по уравнению (2) концентрации БВ (мкмоль/л), РОУ (мгС/л) и ГВ (мгС/л) для разного расхода воды. Линии на рис. 2 соответствуют концентрациям, рассчитанным по уравнению (2). В нахождении эмпирических констант уравнения (2) использовались все данные, кроме результатов, полученных 2 августа 2013 г. во время тайфуна. Расход воды в этот день составлял 935 м³/с. Для этого случая концентрации всех биогенных веществ оказались аномально высокими: 4,64, 310,10 и 34,16 мкмоль/л соответственно для фосфора, кремния и DIN. Значения концентрации РОУ и ГВ составили 14,30 и 7,67 мгС/л, что существенно выше рассчитанных по уравнению (2). Несмотря на указанные выше недостатки соотношения (2), оно позволяет оценить суточные потоки БВ и РОУ (J_i), поставляемые р. Раздольной в Амурский залив:

$$J_i = a_i Q^{b_i} \cdot Q. \quad (3)$$

Результаты расчета показаны на рис. 3. Следует отметить, что потоки взвеси на основе датчика мутности далее не оценивались ввиду высокого уровня неопределенности в таких оценках. На рис. 3 видна неравномерность потоков как внутри года, так и между годами. Эта неравномерность обусловлена прежде всего неравномерностью расхода реки в течение года и между годами.

Для более детального исследования неравномерности и тенденции потоков БВ и РОУ между годами нами были рассчитаны годовые потоки (F_i) с помощью соотношения

$$F_i = \sum_n J_i(n). \quad (4)$$

Величина годового потока вещества (i) равна сумме суточных n -потоков в году (365 или 366 — в високосный год). Результаты расчетов приведены на рис. 4.

На рис. 4 видна тенденция увеличения годовых потоков биогенных веществ и РОУ, поставляемых р. Раздольной в Амурский залив за период с 2003 по 2017 г. Этот рост обусловлен ростом среднегодового расхода р. Раздольной на данном интервале времени (рис. 5). Линейная аппроксимация увеличения среднегодовых расходов реки за 15-летний период дает коэффициент корреляции $R^2 = 0,45$, что свидетельствует о значимости данной тенденции. Средний расход воды за данный интервал времени стал равным 87 м³/с, что существенно отличается от общепринятой величины (76 м³/с), однако из-за большого разброса точек это различие статистически незначимо.

Влияние природных факторов на уровень концентраций БВ в реках подробно обсуждалось в литературе [Meubeck, 1982; Berner, Berner, 1996]. Минеральные формы БВ извлекаются из почвенных и грунтовых вод при образовании (фотосинтезе) растительного покрова суши и возвращаются обратно в природную среду при бактериальном разложении органического вещества. Очевидно, что наиболее значимым фактором, влияющим на скорости этих двух разнонаправленных процессов и, соответственно, на концентрации биогенных веществ в подземных и поверхностных водах, в том числе и речных, является климат. Для каждой климатической зональности в работе

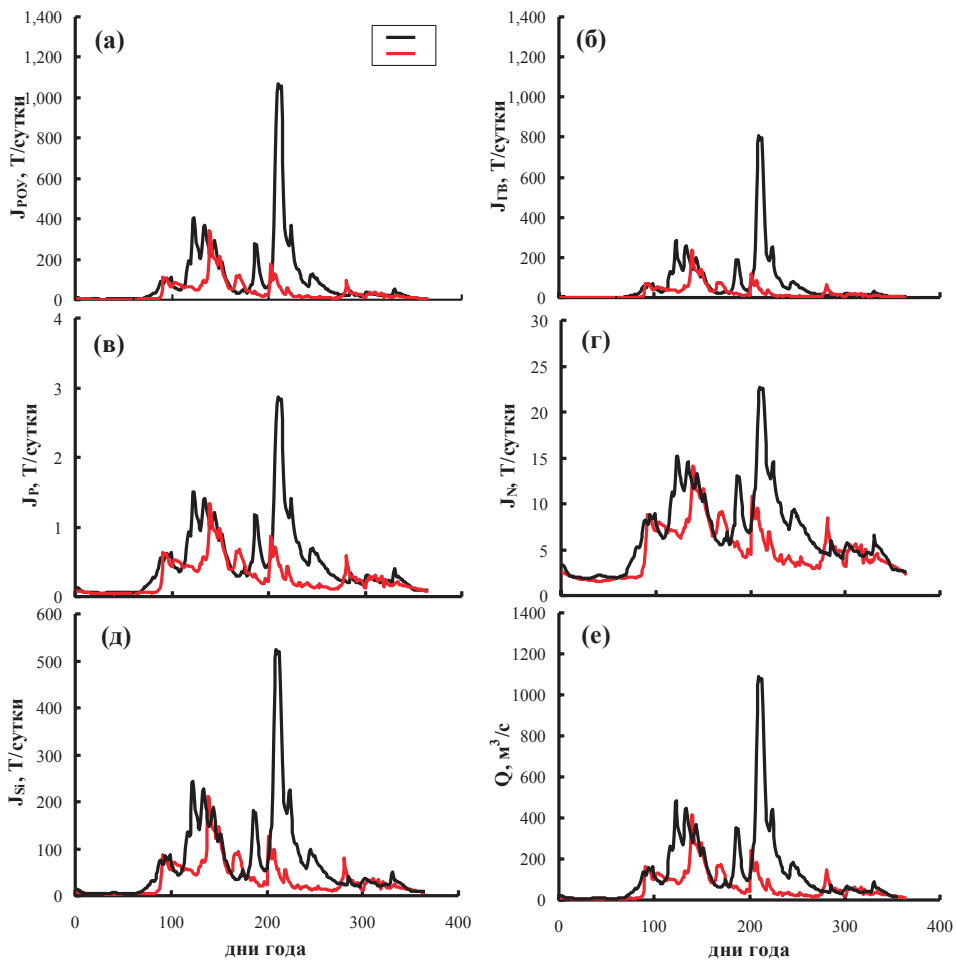


Рис. 3. Суточные потоки растворенного органического углерода (а), гумусового вещества (б), биогенных веществ (в — фосфора, г — азота, д — кремния) в зависимости от дня года, рассчитанные по уравнению (3), поставляемые р. Раздольной в Амурский залив, и расход воды (е) в 2013 г. (черная линия) и в 2014 г. (красная линия)

Fig. 3. Daily fluxes of DOC (a), humic substances (б), phosphorus (в), DIN (г), silica (д), and water discharge (e) from the Razdolnaya/Suifen River into Amur Bay in 2013 (black line) and 2014 (red line)

Мейбека [Meуbeck, 1982] был установлен уровень «природных» концентраций биогенных веществ. В соответствии с принятой им классификацией р. Раздольная, на наш взгляд, ближе всего относится к «таежному» климату. Для этого климата уровень «природных» концентраций можно установить по гидрохимическим характеристикам р. Партизанской, которая протекает в отрогах Сихотэ-Алиня и в меньшей степени подвержена антропогенному влиянию. Концентрации ионов аммония, нитритов, нитратов, фосфора и кремния в летний сезон для этой реки равны соответственно 1,80; 0,20; 15,0; 0,17 и 205,0 мкмоль/л [Семкин и др., 2018]. Концентрация РОУ в р. Партизанской равна 4 мгС/л. Гидрохимия этой реки мало различается зимой и летом. Очевидно, что высокие концентрации БВ в р. Раздольной (см. рис. 2) в сравнении с р. Партизанской обусловлены не природными факторами, а антропогенным воздействием.

Как уже ранее отмечалось [Михайлик и др., 2011], эвтрофикация р. Раздольной происходит уже на китайской территории, т.е. высокие суммарные концентрации ионов аммония и нитратов (более 200 мкмоль/л в зимний сезон) наблюдаются у с. Полтавка. На российской территории также есть антропогенные источники БВ. К сожалению,

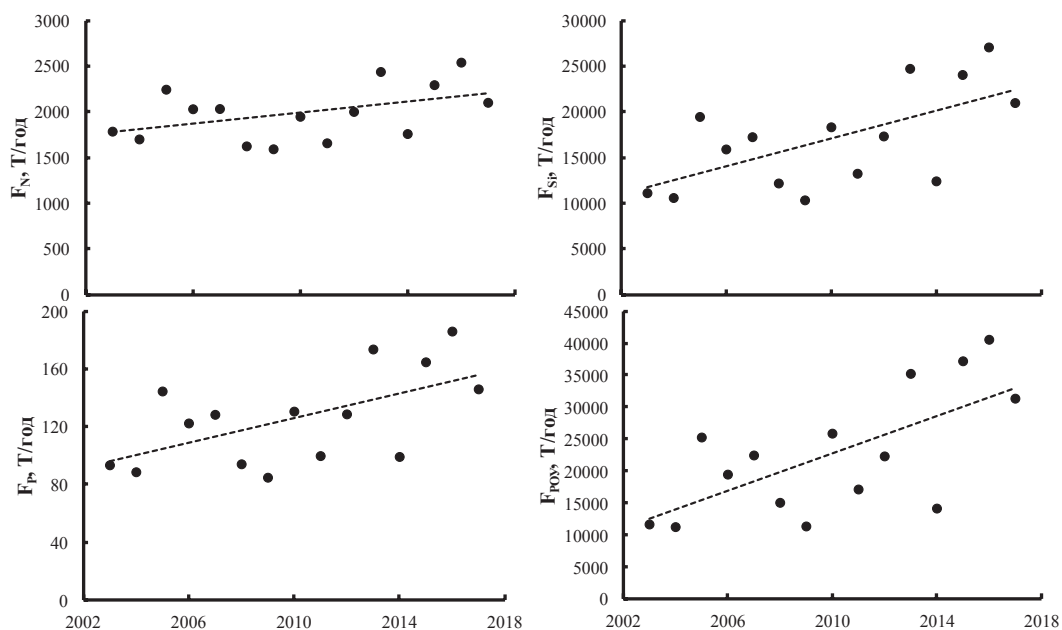


Рис. 4. Годовые потоки (F) биогенных веществ (N, Si, P) и растворенного органического углерода (ПОУ) за период с 2003 по 2017 г.

Fig. 4. Annual fluxes of DOC and nutrients (N, Si, P) from the Razdolnaya/Suifen River into Amur Bay in 2003–2017

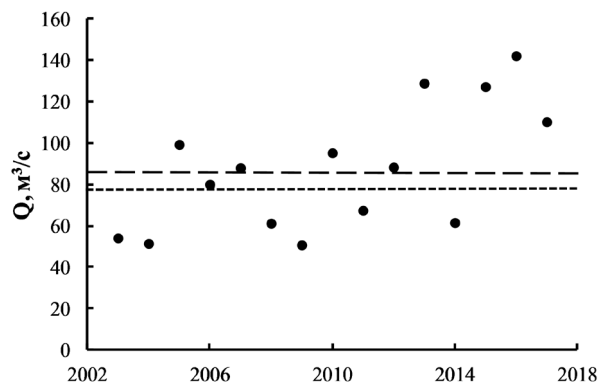


Рис. 5. Средний годовой расход р. Раздольной в период с 2003 по 2017 г. Точечная линия — общепринятый среднегодовой расход реки (76 м³/с), пунктирная — среднегодовой расход за период 2003–2017 гг. (87 м³/с)

Fig. 5. Changes of annual river discharge of the Razdolnaya/Suifen River in 2003–2017. Dashed line — mean annual discharge for 2003–2017 (87 m³/s); dotted line — climatic annual discharge (76 m³/s)

в Октябрьском районе Приморского края в непосредственной близости к реке располагаются сельскохозяйственные поля, в которые вносят удобрения осенью, в период посева озимых культур, и поздней весной, в период культивации. Очевидно, что с атмосферными осадками часть удобрений попадает в реку, что приводит к увеличению концентраций БВ. Другой значимый источник — канализационные стоки г. Уссурийск (общая численность населения с пригородом — около 200 тыс. чел.). Эти стоки подвергаются частичной очистке с помощью отстойников. Однако отстойники расположены под открытым небом и в период сильных дождей (тайфунов) переполняются, в результате в этот период возрастает неконтролируемый канализационный сток в р. Раздольную. Этим отчасти можно объяснить увеличение концентраций БВ, особенно фосфора (4,6 мкмоль/л), в период паводка с расходом воды 935 м³/с. По-видимому, два

процесса приводят к уменьшению концентрации БВ в реке: разбавление речных вод дождевыми осадками и фотосинтез.

В питании реки преобладают дождевые воды, поэтому расход воды может характеризовать степень разбавления речных вод дождевой водой. Действительно, с увеличением расхода воды существует тенденция к уменьшению концентрации БВ и увеличению содержания РОУ (рис. 2). Увеличение концентрации РОУ с ростом расхода воды указывает на то, что атмосферные осадки, прежде чем попасть в реку, просачиваются через почву и почвенные воды, обогащенные органическим веществом, попадают далее в реку. Более того, в пойме нижнего течения реки существует множество озер болотистого типа, которые отделены от основного русла реки, но в период паводков соединяются с ним. Вода из этих озер, содержащая большое количество гумусового вещества, поступает в реку. Этими процессами можно объяснить увеличение доли ГВ (до 75 %) от общего содержания РОУ в период паводка. Весеннее и осеннее «цветение» речных вод также приводит к уменьшению концентраций БВ [Михайлик и др., 2011]. «Несогласованные» во времени процессы поступления БВ и РОУ в реку и их изъятие приводят к большому разбросу данных относительно предложенного нами эмпирического степенного уравнения (2).

Уравнение (3) позволяет оценить как величину потоков БВ и РОУ в Амурский залив, так и их характер. За период 2003–2017 гг. средняя величина годового потока в Амурский залив фосфора, азота, кремния и РОУ равна соответственно 126, 1988, 17044 и 22718 т/год. Ежегодный поток неорганических форм фосфора и азота в Амурский залив, обусловленный канализационными стоками г. Владивосток, составляет соответственно 100 и 700 т/год [Звалинский и др., 2013]. Необходимо отметить, что поток БВ, обусловленный канализационными стоками г. Владивосток, — постоянная величина, в отличие от потоков БВ, поставляемых р. Раздольной. Благодаря муссонному климату потоки БВ и РОУ характеризуются чрезвычайной неравномерностью (рис. 3). По нашим оценкам с помощью уравнения (3) за 4 мес. 2013 г., с мая по август включительно, в Амурский залив поступило 66, 71, 54 и 78 % годового стока соответственно фосфора, кремния, азота и РОУ. В действительности эти оценки занижены, так как при экстремально высоких расходах реки концентрации БВ выше, чем это следует из соотношения (2). Ранее отмечалось, что импульсный характер поставки БВ реками в приемный бассейн вызывает «цветение» фитопланктона и создает избыточную биомассу, которая в результате микробиологического разложения на дне бассейна вызывает гипоксические условия [Anderson and Taylor, 2001; Tishchenko et al., 2013]. Таким образом, муссонный климат и эвтрофированный характер р. Раздольной — важные движущие силы формирования гипоксии придонных вод Амурского залива [Тищенко, 2013]. Неравномерность потоков БВ наблюдается также между годами (рис. 4), она обусловлена неравномерностью годового стока реки (рис. 5). Годовые потоки БВ и РОУ могут различаться более чем в 2 раза, например при сравнении потоков 2009 и 2016 гг. Более дождливые годы приносят большее количество БВ в Амурский залив. В период с 2003 по 2017 г. наблюдается статистически значимая тенденция роста среднегодового расхода р. Раздольной и, соответственно, потоков БВ и РОУ в залив. Таким образом, экологическая ситуация Амурского залива за этот период ухудшилась.

Заключение

Установлено, что концентрации БВ уменьшаются, а РОУ увеличиваются с ростом расхода р. Раздольной. Большой разброс данных относительно предложенного эмпирического уравнения зависимости концентраций БВ от расхода реки обусловлен разнонаправленными процессами поступления БВ в реку от сельскохозяйственных полей и канализационных стоков, с одной стороны, и уменьшения концентраций благодаря процессу фотосинтеза и разбавлению речных вод атмосферными осадками — с другой. Муссонный климат создает импульсный характер потоков БВ и РОУ в Амурский залив

внутри года. Кратковременные большие потоки БВ в залив создают благоприятные условия для «цветения» фитопланктона, которое формирует его «избыточную» биомассу. Годовые потоки БВ и РОУ, поставляемые р. Раздольной в залив, существенно больше в сравнении с канализационными стоками г. Владивосток. Установлена межгодовая неравномерность потоков БВ и РОУ. За период с 2003 по 2017 г. наблюдается тенденция к увеличению годовых потоков БВ и РОУ, обусловленная ростом годового речного стока.

Благодарности

Авторы выражают благодарность н.с. Ю.А. Барабанщикову и к.г.н., с.н.с. П.Ю. Семкину за помощь в выполнении полевых работ.

Финансирование работы

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке приоритетной комплексной программы РАН «Дальний Восток» (гранты № 18-1-007; № 18-1-010) и программ фундаментальных научных исследований, темы АААА-А17-117030110042-2 и АААА-А17-117030110038-5.

Соблюдение этических стандартов

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Информация о вкладе авторов

Т.А. Михайлик — сбор данных, анализ и интерпретация полученных результатов, подготовка статьи и окончательное утверждение версии для печати. А.П. Недашковский — обсуждение полученных результатов, качественный пересмотр статьи относительно принципиальных аспектов содержания. Н.Д. Ходоренко — анализ растворенного органического углерода, концентрации гуминовых веществ, обсуждение полученных результатов. П.Я. Тищенко — обсуждение полученных результатов, окончательное утверждение версии для печати.

Список литературы

- Гайко Л.А. Особенности гидрометеорологического режима прибрежной зоны залива Петра Великого (Японское море) : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — 150 с.
- Звалинский В.И., Тищенко П.П., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я. Эвтрофикация зал. Петра Великого // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана : в 2 кн. / гл. ред. В.А. Акуличев. — Владивосток : Дальнаука, 2013. — Кн. 1. — С. 260–293.
- Михайлик Т.А., Тищенко П.Я., Колтунов А.М. и др. Влияние реки Раздольной на экологическое состояние вод Амурского залива (Японское море) // Вод. ресурсы. — 2011. — Т. 38, № 4. — С. 474–484.
- Нигматулина Л.В. Воздействие сточных вод контролируемых выпусков на экологическое состояние Амурского залива : дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2005. — 174 с.
- Огородникова А.А. Эколого-экономическая оценка воздействия береговых источников загрязнения на природную среду и биоресурсы залива Петра Великого : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2001. — 193 с.
- Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Михайлик Т.А. и др. Гидрохимические исследования эстуария реки Партизанской (залив Находка, Японское море) в период летней межени // Изв. ТИНРО. — 2018. — Т. 193. — С. 143–152. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-143-152.
- Тищенко П.П. Сезонная гипоксия Амурского залива : дис. ... канд. геогр. наук. — Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2013. — 165 с.
- Тищенко П.Я., Вальманн К., Василевская Н.А. и др. Вклад органического вещества в щелочной резерв природных вод // Океанол. — 2006. — Т. 46, № 2. — С. 211–219.

Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Звалинский В.И. и др. Сезонная гипоксия Амурского залива (Японское море) // Изв. ТИПРО. — 2011. — Т. 165. — С. 136–157.

Тищенко П.Я., Сергеев А.Ф., Лобанов В.Б. и др. Гипоксия придонных вод Амурского залива // Вестн. ДВО РАН. — 2008. — № 6. — С. 115–125.

Anderson T.H. and Taylor G.T. Nutrient Pulses, Plankton Blooms, and Seasonal Hypoxia in Western Long Island Sound // *Estuaries*. — 2001. — Vol. 24, № 2. — P. 228–243.

Berner E.K., Berner R.A. Global environment: water, air, and geochemical cycles. — New Jersey : Prentice Hall, 1996. — 376 p.

Breitbart D., Levin L.A., Oschlies A. et al. Declining oxygen in the global and coastal waters // *Science*. — 2018. — Vol. 359, Iss. 6371. DOI: 10.1126/science.aam7240.

Cai W.-J., Hu X., Huang W.-J. et al. Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication // *Nature Geoscience*. — 2011. — Vol. 4(11). — P. 766–770. DOI: 10.1038/ngeo1297.

Doney S.C. The Growing Human Footprint on Coastal and Open-Ocean Biogeochemistry // *Science*. — 2010. — Vol. 328, Iss. 6985. — P. 1512–1516. DOI: 10.1126/science.1185198.

Dore J.E., Lukas R., Sadler D.W. et al. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. — 2009. — Vol. 106, № 30. — P. 12235–12240. DOI: 10.1073/pnas.0906044106.

Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers // *Am. J. Sci.* — 1982. — Vol. 282, Iss. 4. — P. 401–450. DOI: 10.2475/ajs.282.4.401.

Riedel B., Diaz R., Rosenberg R., Stachowitsch M. Chapter 10. The ecological consequences of marine hypoxia: from behavioural to ecosystem responses // *Stressors in the Marine Environment: Physiological and ecological responses; societal implications* / eds M. Solan and N.M. Whiteley. — Oxford : Oxford Univ. Press, 2016. — P. 175–194. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780198718826.003.0010.

Schmidt S., Stramma L., Visbeck M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades // *Nature*. — 2017. — Vol. 542(7641). — P. 335–339. DOI: 10.1038/nature21399.

Tishchenko P.Ya., Lobanov V.B., Zvalinsky V.I. et al. Seasonal Hypoxia of Amursky Bay in the Japan Sea: Formation and Destruction // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* — 2013. — Vol. 24, № 6. — P. 1033–1050. DOI: 10.3319/TAO.2013.07.12.01(Oc).

References

Gaiko, L.A., *Osobennosti gidrometeorologicheskogo rezhima pribrezhnoy zony zaliva Petra Velikogo (Yaponskoye more)* (Peculiarities of hydrometeorological regime of the coastal zone in the Peter-the-Great Bay (Sea of Japan)), Vladivostok : Dal'nauka, 2005.

Zvalinskii, V.I., Tishchenko, P.P., Mikhailik, T.A., and Tishchenko, P.Ya., Eutrophication of Peter the Great Bay, in *Okeanologicheskie issledovaniya dal'nevostochnykh morei i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* (Oceanological Studies of the Far Eastern Seas and the Northwestern Pacific Ocean), 2 vols., Akulichev, V.A., ed., Vladivostok: Dal'nauka, 2013, vol. 1, pp. 260–293.

Mikhailik, T.A., Tishchenko, P.Y., Koltunov, A.M., Tishchenko, P.P., and Shvetsova, M.G., The effect of Razdol'naya River on the environmental state of Amur Bay (the Sea of Japan), *Water Resour.*, 2011, vol. 38, no. 4, pp. 512–521.

Nigmatulina, L.V., The impact of wastewater of controlled releases on the ecological state of the Amur Bay, *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2005.

Ogorodnikova, A.A., *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka vozdeistviya beregovykh istochnikov zagryazneniya na prirodnyuyu sredu i bioresursy zaliva Petra Velikogo* (Ecological and Economic Assessment of the Impact of Coastal Pollution Sources on the Natural Environment and Bioresources of Peter the Great Bay), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2001.

Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Ya., Mikhailik, T.A., Barabanshchikov, Yu.A., Pavlova, G.Yu., Sagalaev, S.G., Tishchenko, P.P., Shvetsova, M.G., and Shkirknikova, E.M., Hydrochemical studies of the Partizanskaya River estuary (Nakhodka Bay, Japan Sea) in summer season of low water discharge, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 193, pp. 143–152. doi 10.26428/1606-9919-2018-193-143-152

Tishchenko, P.P., Seasonal hypoxia of Amurskiy Bay, *Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*, Vladivostok: TOI DVO RAN, 2013.

Tishchenko, P.Ya., Volkova, T.I., Zvalinskii, V.I., Khodorenko, N.D., Shkirknikova, E.M., Wallmann, K., and Vasilevskaya, N.A., The contribution of organic matter to the alkaline reserve of natural waters, *Oceanology*, 2006, vol. 46, no. 2, pp. 192–199.

Tishchenko, P.Ya., Lobanov, V.B., Zvalinskii, V.I., Sergeev, A.F., Volkova, T.I., Koltunov, A.M., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., Tishchenko, P.P., and Shvetsova, M.G., Seasonal hypoxia

in the Amur Bay (Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2011, vol. 165, pp. 136–157.

Tishchenko, P.Ya., Sergeev, A.F., Lobanov, V.B., Zvalinsky, V.I., Koltunov, A.M., Mikhailik, T.A., Tishchenko, P.P., and Shvetsova, M.G., Hypoxia of the bottom waters of Amursky Bay, *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2008, no. 6, pp. 115–125.

Anderson, T.H. and Taylor, G.T., Nutrient Pulses, Plankton Blooms, and Seasonal Hypoxia in Western Long Island Sound, *Estuaries*, 2001, vol. 24, no. 2, pp. 228–243.

Berner, E.K. and Berner, R.A., *Global environment: water, air, and geochemical cycles*, New Jersey: Prentice Hall, 1996.

Breitburg, D., Levin, L.A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F.P., Conley, D.J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G.S., Limburg, K.E., Montes, I., Naqvi, S.W.A., Pitcher, G.C., Rabalais, N.N., Roman, M.R., Rose, K.A., Seibel, B.A., Telszewski, M., Yasuhara, M., Zhang, J., Declining oxygen in the global and coastal waters, *Science*, 2018, vol. 359, no. 6371. doi 10.1126/science.aam7240

Cai, W.-J., Hu, X., Huang, W.-J., Murrell, M.C., Lehrter, J.C., Lohrenz, S.E., Chou, W.-C., Zhai, W., Hollibaugh, J.T., Wang, Y., Zhao, P., Guo, X., Gundersen, K., Dai, M., and Gong, G.-C., Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication, *Nature Geoscience*, 2011, vol. 4, no. 11, pp. 766–770. doi 10.1038/ngeo1297

Doney, S.C., The Growing Human Footprint on Coastal and Open-Ocean Biogeochemistry, *Science*, 2010, vol. 328, no. 6985, pp. 1512–1516. doi 10.1126/science.1185198

Dore, J.E., Lukas, R., Sadler, D.W., Church, M.J., and Karl, D.M., Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2009, vol. 106, no. 30, pp. 12235–12240. doi 10.1073/pnas.0906044106

Meybeck, M., Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers, *Am. J. Sci.*, 1982, vol. 282, no. 4, pp. 401–450. doi 10.2475/ajs.282.4.401

Riedel, B., Diaz, R., Rosenberg, R., and Stachowitsch, M., Chapter 10. The ecological consequences of marine hypoxia: from behavioural to ecosystem responses, *Stressors in the Marine Environment: Physiological and ecological responses; societal implications*, Solan, M. and Whiteley, N.M., eds., Oxford: Oxford Univ. Press, 2016, pp. 175–194. doi 10.1093/acprof:oso/9780198718826.003.0010

Schmidtke, S., Stramma, L., and Visbeck, M., Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades, *Nature*, 2017, vol. 542, no. 7641, pp. 335–339. doi 10.1038/nature21399

Tishchenko, P.Ya., Lobanov, V.B., Zvalinsky, V.I., Sergeev, A.F., Koltunov, A., Mikhailik, T.A., Tishchenko, P.P., Shvetsova, M.G., Sagaliev, S., and Volkova, T., Seasonal Hypoxia of Amursky Bay in the Japan Sea: Formation and Destruction, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2013, vol. 24, no. 6, pp. 1033–1050. doi 10.3319/TAO.2013.07.12.01(Oc)

Atlas Primorskogo kraja (Atlas of the Primorsky Territory), Vladivostok: Dal'press, 1998.

Metody gidrokhimicheskikh issledovaniy osnovnykh biogennykh elementov (Methods of Hydrochemical Studies of Main Nutrients), Moscow: VNIRO, 1988.

Поступила в редакцию 2.03.2020 г.

После доработки 15.03.2020 г.

Принята к публикации 20.05.2020 г.