

**УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

УДК 574.55(282.257.95)

**В.И. Звалинский<sup>1</sup>, А.А. Марьяш<sup>1</sup>, П.Я. Тищенко<sup>1</sup>, С.Г. Сагалаев<sup>1</sup>,  
П.П. Тищенко<sup>1</sup>, М.Г. Швецова<sup>1</sup>, Р.В. Чичкин<sup>1</sup>, Т.А. Михайлик<sup>1</sup>,  
А.М. Колтунов<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;

<sup>2</sup> Институт биологии моря ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17

**ПРОДУКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭСТУАРИЯ  
РЕКИ РАЗДОЛЬНОЙ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА**

Проведено изучение световых условий и условий обеспечения биогенными веществами как факторов формирования первичной продукции (ПП) эстуария р. Раздольной в период ледостава. Показано, что в январе-феврале величину ПП эстуария лимитирует интенсивность солнечной радиации. Первичная продукция начинает формироваться в районе бара, что проявляется ростом содержания хлорофилла и кислорода. При смешении речных и морских вод при солёности 5 ‰ и выше происходит интенсивное извлечение из среды неорганических форм фосфатов (DIP). Вследствие этого в интервале солёности 5–20 ‰ наблюдается аномально высокое отношение неорганических форм азота (DIN) к фосфору, достигающее значений  $DIN : DIP \approx 200$ . Проведены оценки величины ПП эстуария р. Раздольной на основании данных о световых условиях и по извлечению из среды биогенных веществ. Оценки ПП двумя методами близки между собой и в разных местах эстуария могут составлять от 0 до 500 мгС/м<sup>2</sup>день. При этом в речной части эстуария величина ПП близка к нулю. Ледяной и снежный покровы являются факторами дополнительного лимитирования ПП светом.

**Ключевые слова:** первичная продукция, эстуарий, река Раздольная, ледостав, свет, биогенные элементы.

---

\* Звалинский Владимир Иванович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, e-mail: biomar@mail.ru; Марьяш Анна Анатольевна, научный сотрудник, e-mail: annam@poi.dvo.ru; Тищенко Павел Яковлевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией, e-mail: ttravel@poi.dvo.ru; Сагалаев Сергей Григорьевич, научный сотрудник, e-mail: sagalaev@poi.dvo.ru; Тищенко Петр Павлович, кандидат географических наук, научный сотрудник, e-mail: eq15@poi.dvo.ru; Швецова Мария Геннадиевна, научный сотрудник, e-mail: chippers@rambler.ru; Чичкин Руслан Васильевич, научный сотрудник, e-mail: rv@poi.dvo.ru; Михайлик Татьяна Александровна, младший научный сотрудник, e-mail: tatyana-libra@mail.ru; Колтунов Алексей, ведущий инженер, e-mail: iceclimber@yandex.ru.

Zvalinsky Vladimir I., D.Sc., principal researcher, e-mail: biomar@mail.ru; Mar'yash Anna A., researcher, e-mail: annam@poi.dvo.ru; Tishchenko Pavel Ya., D.Sc., head of laboratory, e-mail: ttravel@poi.dvo.ru; Sagalaev Sergey G., researcher, e-mail: sagalaev@poi.dvo.ru; Tishchenko Petr P., Ph.D., researcher, e-mail: ek15@poi.dvo.ru; Shvetsova Maria G., researcher, e-mail: chippers@rambler.ru; Chichkin Ruslan V., researcher, e-mail: rv@poi.dvo.ru; Mikhailik Tatyana A., junior researcher, e-mail: tatyana-libra@mail.ru; Koltunov Alexey M., leading engineer, e-mail: iceclimber@yandex.ru.

Zvalinsky V.I., Mar'yash A.A., Tishchenko P.Ya., Sagalaev S.G., Tishchenko P.P., Shvetsova M.G., Chichkin R.V., Mikhailik T.A., Koltunov A.M. Production patterns in the estuary of the Razdolnaya River in period of freezing // *Izv. TINRO.* — 2016. — Vol. 185. — P. 155–174.

Light conditions and nutrients supply, as factors of primary production, are considered for the Razdolnaya River estuary in period of freezing (January–March). Water samples were collected at the water surface and at the bottom for measuring of salinity and concentrations of chlorophyll (Chl), phosphate, nitrite, nitrate, ammonium, and silicate. Profiles of water temperature, conductivity, Chl fluorescence, and turbidity were measured *in situ* by CTD-probe RBR XR-620; besides, vertical attenuation of PAR was measured at each station. The internal estuary (salinity < 10 ‰) was characterized by high values of the light diffuse attenuation coefficient ( $k_d \approx 2 \text{ m}^{-1}$  that corresponded to the euphotic depth  $z_{eu} < 2.5 \text{ m}$ ) because of high turbidity (> 5 FTU) and high concentration of humine substances (up to 2 mgC/l) in the river waters. The ice cover lowered light intensity in the river water, too. In the zone close to the river bar with salinity 1–25 ‰, Chl concentration was 0.4–1.7 mg/m<sup>3</sup> irrespective of salinity. DIN (dissolved inorganic nitrogen) and DISi (dissolved inorganic silicon) had conservative behaviour in this zone, the DISi : DIN ratio was  $\approx 0.7$ –1.1. These features indicate an absence of significant production or destruction of organic matter in the internal estuary. However, intensive removal of dissolved inorganic phosphorus (DIP) (up to 80 %) was observed in this zone, that's why the extraordinary high DIN : DIP ratio was observed under salinity 5–20 ‰ (up to 200 : 1, though the usual DIN : DIP ratio in the river water is close to Redfield ratio: DIN : DIP = (21–27) : 1). In the external estuary (salinity 15–32 ‰), the water became more transparent ( $k_d = 0.5$ –0.3 m<sup>-1</sup>;  $z_{eu} \approx 9$ –15 m) and both chlorophyll concentration and dissolved oxygen content became higher (Chl up to 20 mg/m<sup>3</sup>, DO up to 500 μM/kg) as the result of high primary production, whereas nutrients concentrations became lower: DIP were completely removed and DIN and DISi retained 10–25 % of their initial values in the river water. The primary production value was evaluated by two ways: on the data of light intensity and on the data of nutrients removal. The light conditions in the internal estuary in February–March corresponded to the value 20–80 mgC/m<sup>2</sup>d which declines in 6–13 times and 50–100 times (close to zero) under the ice and under the ice with snow, respectively. In the external estuary, the light conditions in March corresponded to the value 300–600 mgC/m<sup>2</sup>d in the areas without ice and to the value lower in 6–13 times under the ice. The nutrients removal corresponded to the primary production value  $\approx 200$ –400 mgC/m<sup>2</sup>d in the external estuary, irrespective of ice cover, that is close to the previous estimation by light conditions. So, the primary production in the Razdolnaya River estuary changes in winter in the range from 0 to 500 mgC/m<sup>2</sup>d, increasing seaward, the ice and snow are the factors of its limitation by light.

**Key words:** primary production, estuary, Razdolnaya River, freezing, light, nutrients.

## Введение

Эстуарии являются наиболее продуктивными экосистемами, богатыми разнообразной флорой и фауной. Это объясняется высоким уровнем первичной продукции (ПП) вследствие благоприятных условий снабжения биогенными веществами (БВ), выносимыми реками (Одум, 1986). В формировании ПП эстуариев ведущую роль играют три фактора: свет, снабжение БВ и смешение вод. Обычно в приустьевой зоне рек лимитирующим фактором ПП служат неорганические формы фосфатов (DIP, Dissolved Inorganic Phosphates), что характерно практически для всех исследованных рек, в том числе для крупнейших рек планеты: Янцзы (Xiuren et al., 1988), Хуанхэ (Turner et al., 1990), Миссисипи (Lohrenz et al., 1999). Вместе с тем вследствие высокой мутности речные воды р. Миссисипи характеризуются достаточно высоким диффузным коэффициентом ослабления света («diffuse attenuation coefficient»)  $k_d \approx 0,877 \text{ m}^{-1}$  (эвфотическая глубина  $z_{eu} \approx 5 \text{ м}$ ), что обуславливает световое лимитирование ПП. Неконсервативное поведение биогенных веществ при промежуточных соленостях (10–20 ‰) в р. Миссисипи связывается с процессами первичной продукции (изъятие БВ из среды), что сопровождалось увеличением содержания хлорофилла при этой же солености; при более высокой солености проявлялось лимитирование ПП фосфатами (Lohrenz et al., 1999). Таким образом, в эстуариях лимитирующие факторы могут меняться: лимитирование ПП светом во внутреннем эстуарии может смениться лимитированием БВ во внешнем эстуарии.

Проведенные ранее исследования эстуария р. Раздольной в летний период показали, что лимитирование ПП светом наблюдается до солености около 8 ‰, когда извлекается из среды до 95 % фосфатов. При больших значениях солености наблюдалось последовательно лимитирование ПП DIP до  $S \approx 12$  ‰, затем соединениями азота (DIN, Dissolved Inorganic Nitrogen) до  $S \geq 20$  ‰, после этого наблюдалось лимитирование ПП силикатами (DISi; Dissolved Inorganic Silicates) (Звалинский и др., 2005; Звалинский, Тищенко, 2005; Тищенко и др., 2005; Марьяш и др., 2010, 2015). Непосредственно в период паводка факторы, лимитирующие ПП, сменялись в той же последовательности, однако эти проявления были несколько смещены в область более высокой солености (Звалинский и др., 2008а).

Исследования в эстуарии р. Раздольной в январе 2007 г. (снежный покров отсутствовал) в районе бара (соленость в поверхностном слое воды —  $6 < S < 20$  ‰) показали, что содержание хлорофилла (Хл) контролировалось светом и изменялось в пределах 4,0–6,5 мг/м<sup>3</sup>. В середине февраля после обильного снегопада содержание Хл уменьшилось на порядок — до 0,6 мг/м<sup>3</sup> (Звалинский и др., 2008б). Одновременно с этим было зарегистрировано высокое содержание Хл на нижней поверхности льда (до 40 мг/м<sup>2</sup>). Выполненный в январе-феврале 2008 г. разрез по эстуарию р. Раздольной показал, что вследствие низкой интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР) в этот период величина ПП в подледной воде зависит от прозрачности льда и наличия снежного покрова (Звалинский и др., 2010). Однако детально лимитирование ПП различными факторами среды в эстуарии р. Раздольной в период ледостава не исследовалось.

В публикациях А.С. Важовой и Ю.И. Зуенко (2015а, б) обсуждается неконсервативность поведения главных биогенных веществ в эстуариях рек Раздольная и Суходол, при этом во внутренних эстуариях неконсервативность характеризовалась добавлением, а во внешних — изъятием БВ. Эти факты, по мнению авторов, свидетельствуют о том, что во внутренних эстуариях превалирует деструкция органического вещества, тогда как во внешних — его продукция. Во внешней эстуарии р. Раздольной ПП оценена величиной до 5 гС/м<sup>3</sup>день. Столь высокую величину ПП авторы объясняют добавлением биогенных веществ (в частности, фосфатов) за счет деструкции ОВ во внутреннем эстуарии. Вопрос о продукционных процессах в эстуарии р. Раздольной в период ледостава и возможного лимитирования ПП факторами среды в работах не обсуждался.

Цель данной работы — оценить параметры светового и гидрохимических факторов среды, особенности формирования продукционных характеристик вод и величины ПП в эстуарии р. Раздольной в период ледостава.

## Материалы и методы

Объектом исследований был эстуарий р. Раздольная — Амурский залив (зал. Петра Великого Японского моря) (рис. 1). Эстуарий — область смешения речных и морских вод. Река Раздольная — самая крупная река, впадающая в Амурский залив и оказывающая большое влияние на его экологическое состояние.

Длина изучаемого эстуария не является неизменной величиной во внутренней и внешней его частях и определяется главным образом двумя факторами: расходом реки и интенсивностью и направлением ветров. Так, в период паводка в августе 2005 г. влияние речного стока в заливе наблюдалось на расстоянии более 50 км от устья реки (Звалинский и др., 2008б). При среднем годовом расходе воды 76 м<sup>3</sup>/с во время высокого паводка в августе 2005 г. расход реки составлял 440 м<sup>3</sup>/с, а в июле 2008 г. расход достигал 800 м<sup>3</sup>/с (Михайлик и др., 2011). Минимальный расход наблюдается в период с 15 января до 3 марта — от 1,6 до 5,0 м<sup>3</sup>/с (рис. 1, г).

Становление льда в эстуарии обычно начинается в ноябре, сход льда происходит в конце марта. Наиболее длительно ледостав продолжается во внутреннем эстуарии — до конца марта (более 90 сут). Во внешней эстуарии продолжительность ледостава меньше — от 50 до 70 сут в зависимости от удаленности акватории от бара. В период ледостава морские воды проникают в реку на расстояние до 30 км.

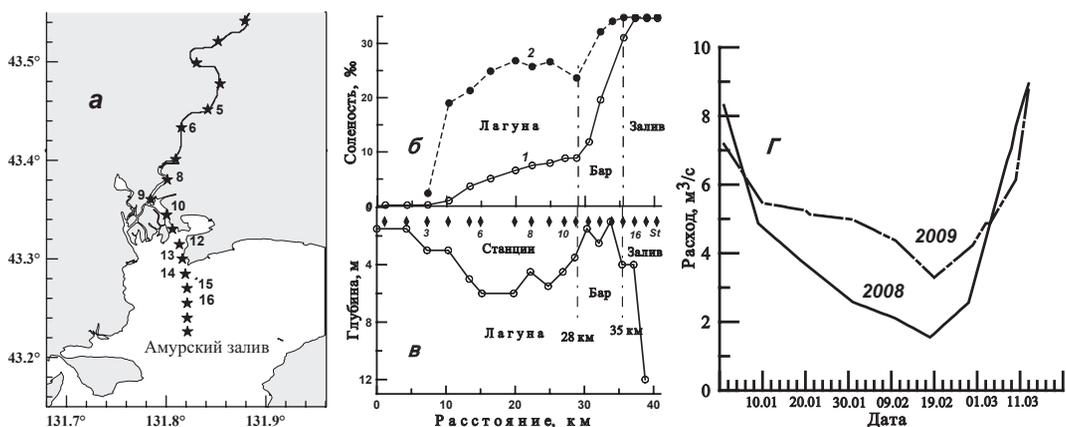


Рис. 1. Экспедиции в январе и марте 2009 г.: а — карта расположения станций; б — изменение солености в поверхностном (1) и придонном (2) горизонтах; в — глубины на станциях (станции обозначены ромбиками и арабскими цифрами); г — расход реки в январе-марте в 2008 и 2009 гг.

Fig. 1. Surveys in January and March, 2009: а — scheme of stations; б — distribution of salinity at the water surface (1) and at the bottom (2); в — depth, by stations (the stations are numbered); г — river discharge in January-March of 2008 and 2009

На станциях отбирали пробы льда, подледной воды и верхнего слоя осадков. В пробах воды определяли соленость, концентрации БВ (фосфаты, нитриты, нитраты, аммоний, кремний), хлорофилл (Хл) (Методы ..., 1988\*; Звалинский и др., 2008б, 2010).

Начиная с 2008 г. на каждой станции с помощью СТД-зонда RBR XR-620 измеряли электропроводность, флуоресценцию Хл и мутность в единицах FTU (Formazin Turbidity Units). Фотометром проводили измерения вертикального распределения ФАР. Для калибровки флуоресценции Хл его концентрацию в пробах воды дополнительно определяли спектрофотометрическим методом (Звалинский и др., 2010). В период с 2006 по 2010 г. лабораторией гидрохимии ТОИ ДВО РАН было проведено 6 зимних экспедиций в эстуарии р. Раздольной (табл. 1).

## Результаты и их обсуждение

### Световые условия в эстуарии р. Раздольной

Свет является необходимым энергетическим фактором, формирующим первичную продукцию. Очевидно, что величина ПП при лимитировании светом определяется количеством поглощенного света. Интенсивность света уменьшается с глубиной по экспоненте в соответствии с законом Ламберта-Бера ( $k_d$  — коэффициент диффузного ослабления света,  $m^{-1}$ ;  $z$  — глубина, м):

$$I_z = I_0 \cdot \exp(-k_d \cdot z) = I_0 e^{-k_w z - k_{sus} z - k_{Chl} z} \quad (1)$$

Обычно для морской воды коэффициент ослабления света  $k_d = k_w + k_{sus} + k_{Chl}$  является суммой коэффициентов его поглощения водой, взвесью и хлорофиллом фитопланктона ( $k_{Chl} = E_{Chl} C_{Chl} \cdot E_{Chl} \approx 16-40 \text{ м}^2/\text{г Хл}$  — экстинкция);  $C_{Chl}$  — концентрация хлорофилла,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $I_0$  — интенсивность света на поверхности, моль квантов/ $\text{м}^2\text{с}$ . Известно, что акватории, где заметно влияние речного стока, характеризуются высоким содержанием гуминовых веществ (ГВ), которые интенсивно поглощают свет (Буренков и др., 2001). Интенсивное поглощение солнечной радиации органическим веществом было зарегистрировано на шельфе Восточно-Сибирского моря (Пугач, Пипко, 2012). Таким образом, в состав общего коэффициента ослабления света в эстуарии должен быть добавлен коэффициент поглощения ГВ  $k_{HS}$ :  $k_d = k_w + k_{sus} + k_{Chl} + k_{HS}$

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

Таблица 1

Гидрохимические параметры и потоки главных биогенных веществ вод р. Раздольной в зимний и летний сезоны экспедиций ТОИ ДВО РАН

Table 1

Chemical parameters and fluxes of the main nutrients in the Razdolnaya River waters in winter and summer, by the data of Pacific Oceanological Institute expeditions

| Съемка                                     | Параметр             | Элемент |       |       | Расход,<br>10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup> /сут |
|--|----------------------|---------|-------|-------|--|
|  |                      | DIN     | DIP   | DISi  |  |
| Зимний сезон                               |                      |         |       |       |  |
| Март 2006 г.                               | Концентрация, мкМ    | 140,0   | 3,3   | 280,0 | 0,450  |
|  | Поток, т/сут         | 0,880   | 0,044 | 3,500 |  |
|  | Отношение N : P : Si | 42      | 1     | 85    |  |
| 29.01–06.02.2008 г.                        | Концентрация, мкМ    | 119,0   | 1,8   | 278,0 | 0,216  |
|  | Поток, т/сут         | 0,360   | 0,011 | 1,680 |  |
|  | Отношение N : P : Si | 66      | 1     | 154   |  |
| 13.02.2008 г.<br>(Михайлик и др.,<br>2011) | Концентрация, мкМ    | 270     | 1     | 250   | 0,163  |
|  | Поток, т/сут         | 0,620   | 0,005 | 1,140 |  |
|  | Отношение N : P : Si | 270     | 1     | 250   |  |
| 29.01–05.02.2009 г.<br>I экспедиция        | Концентрация, мкМ    | 352     | 17    | 270   | 0,420  |
|  | Поток, т/сут         | 2,10    | 0,21  | 3,20  |  |
|  | Отношение N : P : Si | 21      | 1     | 16    |  |
| 25.02–04.03.2009 г.<br>II экспедиция       | Концентрация, мкМ    | 350     | 13    | 315   | 0,400  |
|  | Поток, т/сут         | 2,0     | 0,16  | 3,50  |  |
|  | Отношение N : P : Si | 27      | 1     | 24    |  |
| 15–20.02.2010 г.                           | Концентрация, мкМ    | 175,0   | 4,8   | 285,0 | 0,230  |
|  | Поток, т/сут         | 0,560   | 0,033 | 1,800 |  |
|  | Отношение N : P : Si | 36      | 1     | 59    |  |
| Летний сезон                               |                      |         |       |       |  |
| Июль 2001 г.                               | Концентрация, мкМ    | 41,7    | 2,5   | 300,0 | 10,800   |
|  | Поток, т/сут         | 6,3     | 0,8   | 90,0  |  |
|  | Отношение N : P : Si | 16,7    | 1,0   | 120,0 |  |
| Август 2005 г.                             | Концентрация мкМ     | 47,5    | 1,8   | 390,0 | 38,000   |
|  | Поток, т/сут         | 25,0    | 2,6   | 414,0 |  |
|  | Отношение N : P : Si | 26,5    | 1,0   | 217,0 |  |
| Июль 2008 г.<br>(Михайлик и др.,<br>2011)  | Концентрация мкМ     | 110,0   | 2,1   | 280,0 | 17,300   |
|  | Поток, т/сут         | 15,30   | 0,89  | 130,0 |  |
|  | Отношение N : P : Si | 52      | 1     | 133   |  |
| Август 2009 г.                             | Концентрация, мкМ    | 39,4    | 1,6   | 267,0 | 12,000   |
|  | Поток, т/сут         | 6,60    | 0,58  | 90,0  |  |
|  | Отношение N : P : Si | 24,6    | 1,0   | 167,0 |  |
| Май 2011 г.                                | Концентрация, мкМ    | 50,0    | 1,5   | 250,0 | 16,000   |
|  | Поток, т/сут         | 11,20   | 0,72  | 112,0 |  |
|  | Отношение N : P : Si | 33      | 1     | 170   |  |

При переходе от внутреннего эстуария к внешнему происходит увеличение прозрачности воды (уменьшение  $k_d$ ), что обусловлено оседанием взвешенного вещества и смешением мутных речных вод с более прозрачными морскими. Коэффициент ослабления  $k_d$  определяется соотношением

$$k_d = \ln(I_{z_1} / I_{z_2}) / (z_2 - z_1), \quad (2)$$

где  $I_{z_1}$  и  $I_{z_2}$  — интенсивность света на глубине соответственно  $z_1$  и  $z_2$ . Количество ФАР, проникающей в толщу воды, определяется прозрачностью последней, а в период ледостава — прозрачностью льда и снежного покрова. Границей эвфотической зоны, где могут обитать растения в водной среде, считается глубина  $z_{ph}$ , на которую проникает 1 % от падающей на поверхность воды ФАР. На этой глубине дневная первичная продукция фитопланктона соответствует суточному расходу на дыхание, а чистая продукция равна нулю (Ерлов, 1980; Буренков, Васильков, 1983; Раймонт, 1983).

Количество ФАР, падающей на поверхность воды или льда, зависит от времени года и для безоблачного неба определяется высотой солнца  $h$  над горизонтом:  $[I] = [I_0] \cdot \sin(h)$ , где  $[I_0] \approx 6$  моль квантов/м<sup>2</sup> час ( $\approx 1670$  мкмоль/м<sup>2</sup> с) — солнечная постоянная, соответствующая величине ФАР, когда солнце находится в зените ( $h = 90^\circ$ ) (Kirk, 1992). Высота солнца  $h$  для Северного полушария определяется основной астрономической формулой (Бартенева и др., 1971)

$$\sin(h) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\tau) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta), \quad (3)$$

где  $\varphi$  — географическая широта;  $\delta = 23^\circ \cdot \cos(2\pi \cdot (N + 9)/365)$  — склонение ( $N$  — порядковый номер дня года, начиная с 1 января);  $\tau = 2\pi \cdot t/24$  — часовой угол ( $t$  — время суток, час).

При безоблачном небе на широте эстуария р. Раздольной ( $43,3^\circ$ ) годовая доза ФАР составляет 12200 моль квантов/м<sup>2</sup>. Минимальная дневная доза ФАР, 14,1 моль/м<sup>2</sup>, наблюдается в период зимнего солнцестояния (22.12), максимальная, 52,4 моль/м<sup>2</sup>, — во время летнего солнцестояния (22.06) (рис. 2, кривая 1). В период ледостава дневная доза ФАР увеличивается в 2,5 раза: от 14,1 в декабре до 36,0 моль/м<sup>2</sup> в конце марта (рис. 2, кривая 2).

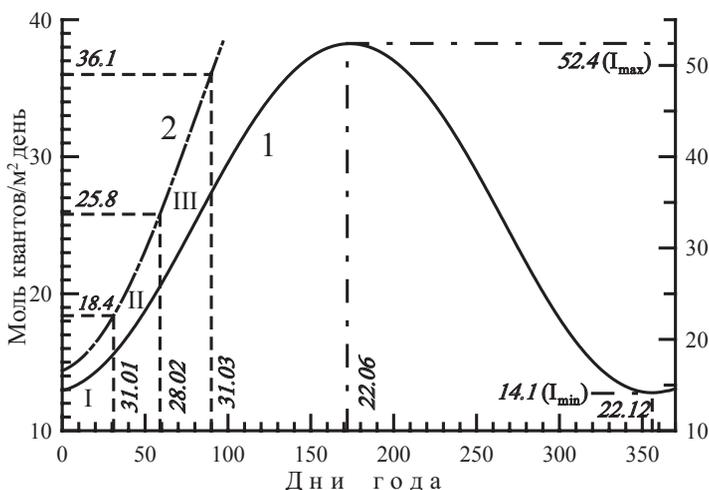


Рис. 2. Дневная доза света (моль квантов/м<sup>2</sup>) на широте эстуария р. Раздольной для безоблачного неба, полученная путем интегрирования соотношения (3): 1 — для всего года (правая шкала); 2 — увеличенный масштаб для периода ледостава (левая шкала). Римскими цифрами указаны месяцы года, арабскими — даты и соответствующие им дневные дозы

Fig. 2. Daily dose of PAR (mole quantum (m<sup>2</sup> day)<sup>-1</sup>) for the latitude of the Razdolnaya River estuary in conditions of cloudless sky calculated by integration of the equation (3): 1 — for the whole year (right scale); 2 — for period of freezing (left scale). Roman numerals — months, Arabic numerals — dates and corresponding daily doses

Таким образом, только в декабре-январе дневная доза света примерно втрое меньше максимальной, во второй половине февраля и марте количество света сопоставимо с другими сезонами. Именно в декабре-январе даже при отсутствии ледяного покрова можно ожидать светового лимитирования ПП. Ледяной и снежный покровы являются факторами дополнительного лимитирования ПП светом.

При смешении речных и морских вод в эстуарии уменьшение мутности водной среды по мере продвижения к внешнему эстуарию определяется в основном двумя факторами: увеличением доли прозрачных морских вод в среде и оседанием взвеси. Сравнение распределения солености, хлорофилла и мутности на разрезе через эстуарий во время первой и второй съемок показывает, что в первом случае поверхностные речные воды вытеснили морские воды из внутреннего эстуария и создали условия для интенсивного развития фитопланктона в верхней части внешнего эстуария вблизи бара (рис. 3, а). Во втором случае смешение вод происходило на всем протяжении эстуария, что делало воду мутной по всей глубине, а развитие фитопланктона менее интенс-

ным (рис. 3, б). Аналогичная картина наблюдалась и в съемках 2006 и 2008 гг. Как видно, в период ледостава морские соленые воды заходят в реку на 20–25 км вверх по течению от бара (рис. 3). Построение корреляционного поля соленость–мутность показало, что между этими двумя параметрами в целом определенной связи не обнаруживается (рис. 4, а).

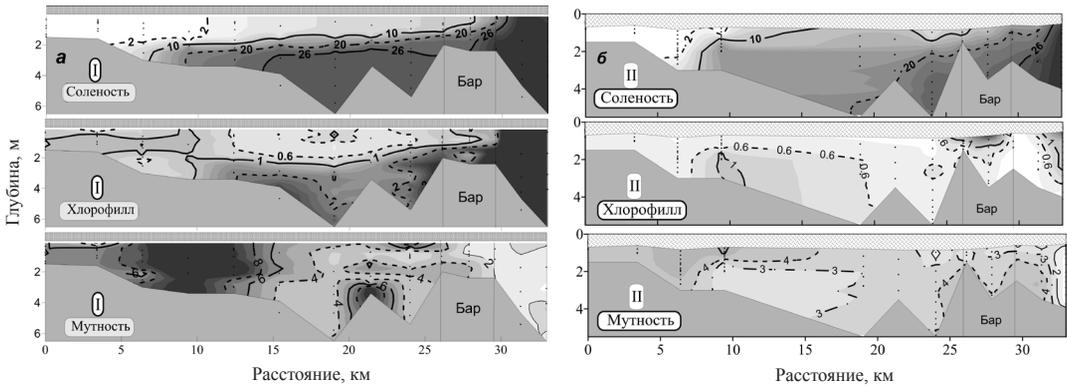


Рис. 3. Распределение солености (‰), хлорофилла (мкг/л) и мутности (FTU) на разрезе через эстуарий р. Раздольной во время I (а) (29.01–05.02) и II (б) (25.02–04.03) экспедиций 2009 г. Данные STD-зондирования

Fig. 3. Distribution of salinity (‰), Chlorophyll ( $\mu\text{g/l}$ ) and turbidity (FTU) at the section across the Razdolnaya estuary on January 29 — February 5 (I) and February 25 — March 4, 2009 (II) (measured by RBR XR-620)

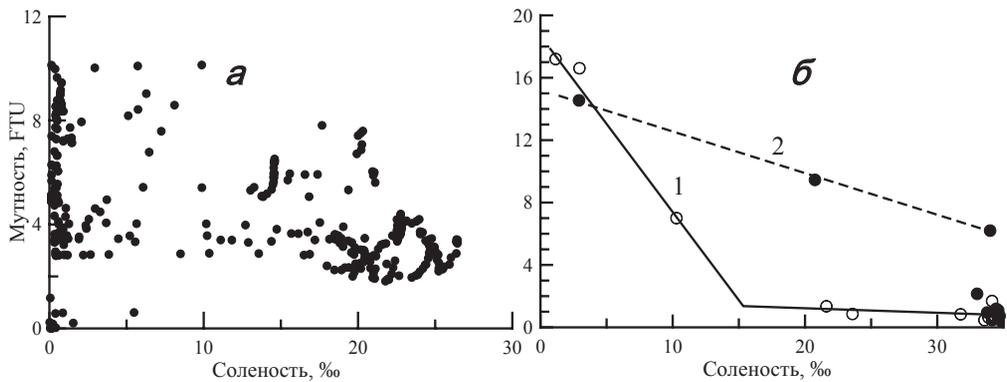


Рис. 4. Корреляционное поле солености и мутности: а — съемка 16–20 февраля 2010 г.; б — съемка 3–4 марта 2006 г.; 1 и 2 — поверхностный и придонный горизонты

Fig. 4. Correlation between turbidity and salinity: а — February 16–20, 2010; б — March 3–4, 2006: 1, 2 — at the surface and at the bottom, respectively

Раздельные измерения солености и мутности в поверхностном и придонном горизонтах воды выявили различие в их поведении. Вода поверхностного горизонта быстро осветляется и уже при солености около 15 ‰ становится прозрачной ( $k_d < 0,3 \text{ м}^{-1}$ ;  $z_{ph} > 15 \text{ м}$ ), вода придонного горизонта остается достаточно мутной вплоть до солености открытого моря — 34 ‰ ( $k_d \approx 2,5 \text{ м}^{-1}$ ;  $z_{ph} \approx 2,0 \text{ м}$ ) (рис. 4, б).

Сравнение вертикальных профилей солености и мутности свидетельствует о том, что для поверхностных вод характерна некоторая «антикорреляция» этих параметров, тогда как для придонного горизонта какая-либо связь между ними не проявляется (рис. 5, а). Вместе с тем наблюдается достаточно тесная связь между мутностью и коэффициентом ослабления:  $k_d \approx 0,35 \cdot \text{FTU}$ ;  $r^2 = 0,97$  (рис. 5, б). Необходимо отметить заметный вклад поглощения гуминовых веществ в поглощение света водной средой. Измерения показали, что экстинкция ГВ при 500 и 450 нм составляет соответственно 0,1 и 0,2 л/мг С м.

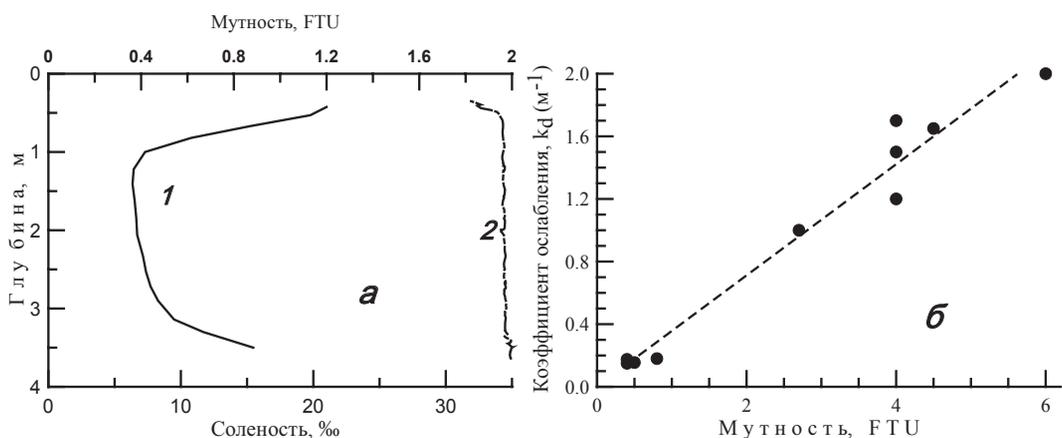


Рис. 5. Вертикальные профили мутности (1) и солёности (2) в точке, расположенной в начале внешнего эстуария, за баром (а); связь мутности (измерение зондом) и коэффициента ослабления света ( $k_d$ , измерение фотометром, соотношение 2) на разрезе через эстуарий 29.01–06.02.2008 г. (б)

Fig. 5. Vertical profiles of turbidity (1) and salinity (2) at the station in the upper part of the external estuary, just after bar (a); relationship between turbidity (FTU) and coefficient of light diffusion ( $k_d$ ) at the section across the estuary on January 29 — February 6, 2008 (b)

В зимний сезон содержание ГВ в р. Раздольной в разные годы составляло около 2,5 мг С/л (Звалинский и др., 2008б); в 2009 г. содержание ГВ в р. Раздольной также составляло 2,5 мг С/л. При таких концентрациях коэффициент ослабления света ГВ составляет  $k_{d500}^{HS} \approx 0,6$  и  $k_{d450}^{HS} \approx 1,2$   $m^{-1}$  соответственно при 500 и 450 нм, или в среднем для области поглощения менее 500 нм —  $k_d^{HS} \approx 1,0$   $m^{-1}$ . Это может дать вклад в общую величину диффузного коэффициента ослабления света  $k_d$  в речной части эстуария до 50 %. В длинноволновой области спектра ( $\lambda > 500$  нм) этот вклад существенно ниже.

Коэффициент  $k_d$  в эстуариях не является постоянной величиной. В поверхностном слое вода менее солёная, но более мутная и с большим содержанием ГВ, поглощение ФАР в верхнем слое будет более интенсивным. С глубиной интенсивность поглощения света уменьшается, т.е. прозрачность увеличивается (см. рис. 3, 6).

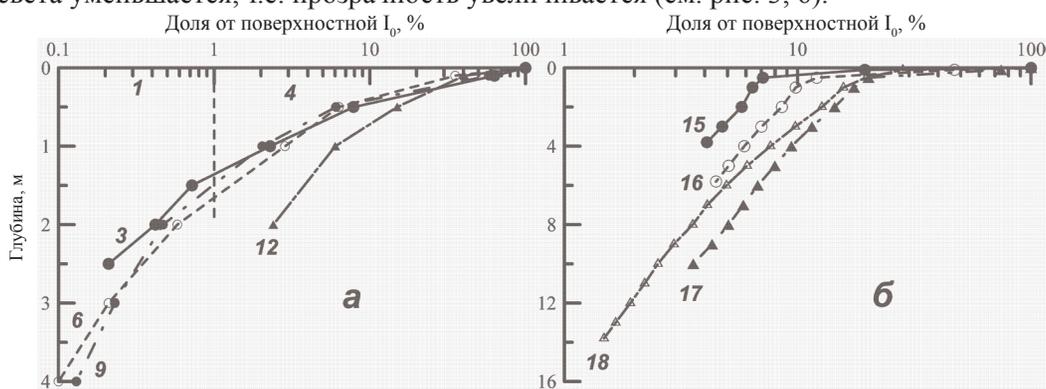


Рис. 6. Уменьшение интенсивности света с глубиной в эстуарии р. Раздольной (съёмка 02.02.2008 г.; полулогарифмический масштаб): а — внутренний эстуарий; б — внешний эстуарий

Fig. 6. Profiles of light attenuation in the Razdolnaya estuary on February 2, 2008 (semi-logarithmic scale): а — internal estuary; б — external estuary

### Биогенные вещества в воде р. Раздольной

Расход реки существенно зависит от сезона (табл. 1), поскольку определяется муссонным характером климата. Минимальный расход реки наблюдается в зимний сезон (январь–февраль; менее 2,5  $m^3/c$ , или около  $0,2 \cdot 10^6$   $m^3/cут$ ), максимальный — в летний сезон (более 100,0  $m^3/c$ , или более  $10,0 \cdot 10^6$   $m^3/cут$ ). Во время летних паводков расход реки может достигать 440  $m^3/c$  ( $38 \cdot 10^6$   $m^3/cут$ ; 3–5 августа 2005 г.) и даже 750  $m^3/c$

( $65 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; 3–5 июня 2008 г.; табл. 1). Содержание БВ в речной воде, как правило, максимально в период минимального расхода (зимой) и достигает 350 мкМ DIN и 17 мкМ DIP, содержание кремния в речной воде изменяется менее резко. Имеются данные о нелинейной связи между расходом реки и выносами БВ (Михайлик и др., 2011). Летом концентрация DIN варьирует в пределах 39–110 мкМ, DIP — 1,5–2,5 мкМ (табл. 1). Минимальные суточные выносы DIN, DIP и  $\text{DISi}$  наблюдаются в период минимального расхода реки (30.01–02.02) и достигают соответственно 0,360, 0,005 и 1,140 т. Летом выносы БВ существенно выше — соответственно до 25,0, 2,6 и 400,0 т (табл. 1). Таким образом, летом выносы БВ более чем в 20 раз выше, чем зимой. В отличие от DIN и DIP концентрация неорганического кремния  $\text{DISi}$  максимальна зимой и летом в период паводка и составляет 250–300 мкМ (табл. 1). Содержание и соотношение БВ различно на протяжении реки на российской территории, поскольку определяется характером локальных (от населенных пунктов) и диффузных (смывы с поверхности земли) источников БВ. Более подробно гидрохимические параметры российской части р. Раздольной в другие сезоны описаны ранее (Михайлик и др., 2011).

В большинстве случаев отношение неорганических форм азота к фосфатам в речной воде находится в пределах  $\text{DIN} : \text{DIP} \approx (20\text{--}66) : 1$  зимой и  $\text{DIN} : \text{DIP} \approx (17\text{--}33) : 1$  летом. Отношение концентраций силикатов и суммарного азота  $\text{DISi} : \text{DIN} \approx (0,7\text{--}2,3) : 1$  зимой и  $\text{DISi} : \text{DIN} \approx (2,5\text{--}8,2) : 1$  летом (табл. 1). Как зимой, так и летом отношение  $\text{DIN} : \text{DIP} > 16 : 1$ , т.е. выше отношения Редфильда ( $16 : 1$ ), что свидетельствует о возможности лимитирования ПП фосфором. В эстуарии р. Раздольной в июле 2001 г. соотношение извлекаемых азота и кремния было  $\Delta \text{DISi} : \Delta \text{DIN} \approx (2,0\text{--}2,6) : 1$  (Звалинский и др., 2005), что примерно вдвое выше, чем регистрируется для открытых морских акваторий, —  $\Delta \text{DISi} : \Delta \text{DIN} \approx 1 : 1$  (Гершанович и др., 1990). Таким образом, соотношение поставляемых речной водой р. Раздольной DIN и  $\text{DISi}$  близко к соотношению извлечения этих элементов клетками. Летом соотношение  $\text{DISi} : \text{DIN}$  в речной воде в 2–4 раза выше, чем соотношение извлечения этих веществ. Наблюдаемые широкие вариации концентраций БВ и их соотношений в речной воде р. Раздольной в основном обусловлены аллохтонными процессами — выносами почвенных и грунтовых вод, а не автохтонными (продукция/деструкция органического вещества и т.д.; см. также Михайлик и др., 2011).

### ***Биогенные вещества при смешении речных и морских вод***

Поведение главных БВ (DIP, DIN и  $\text{DISi}$ ) при смешении речных и морских вод определяется по характеру изменения их концентраций в зависимости от солёности. Если скорость смешения речных и морских вод существенно выше скорости биохимических процессов, то зависимость концентрации БВ от солёности будет близка к линейной (консервативное поведение БВ). В противном случае на смешение вод будут оказывать влияние другие процессы, сопровождающиеся изъятием (первичное продуцирование органического вещества, процессы сорбции на взвеси и т.д.) или добавлением БВ (биохимическое разложение ОВ, процессы десорбции на взвеси). Процессы адсорбции/десорбции в эстуариях в наибольшей степени оказывают влияние на распределение фосфатов (Gao, Mucci, 2003; Spiteri et al., 2008). Не отрицая возможность влияния адсорбции/десорбции на распределение фосфатов в эстуарии р. Раздольной, мы полагаем, что доминирующим процессом, определяющим изъятие из среды или добавление в среду фосфатов и других БВ, является продукция/деструкция органического вещества. Полученные нами результаты будут обсуждаться с этой позиции.

Так, в зимней экспедиции в 2008 г. (29 января — 6 февраля) наблюдалось некоторое извлечение DIP (около 40 % при солёности до 10 ‰), поведение DIN и  $\text{DISi}$  было практически консервативным, концентрации этих веществ линейно уменьшались с увеличением солёности (Звалинский и др., 2010).

В 2009 г. были проведены две зимние экспедиции, чтобы подробнее исследовать поведение БВ: I — в период с 29.01 по 05.02; II — в период с 25.02 по 04.03 (см. рис. 1, табл. 1).

Наибольшее отклонение от консервативного поведения (нелинейное изменение концентрации в градиенте солёности) проявляли фосфаты в I экспедиции 2009 г., когда река имела минимальный расход ( $4,2 \text{ м}^3/\text{с}$ , или  $0,42 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) и наблюдалась максимальная концентрация фосфатов (до  $17 \text{ мкМ}$ ) с ярко выраженным их изъятием: при солёности  $\approx 5 \text{ ‰}$  изъятие составляло около  $80 \%$  (рис. 7, а). Выносы DIP составляли  $0,21 \text{ т/сут}$ , из которых около  $0,19$  изымалось из среды до достижения  $S \approx 5 \text{ ‰}$  (табл. 2, рис. 7, а). В период II экспедиции изъятие DIP также было значительным: при  $S \approx 10 \text{ ‰}$  оно составляло более  $60 \%$  (рис. 7, б), при этом суточное изъятие DIP составляло примерно половину от изъятия в I экспедиции ( $0,1 \text{ т}$ ; табл. 2). Таким образом, в обоих случаях большая часть фосфатов извлекалась во внутреннем эстуарии (см. рис. 1, б, в).

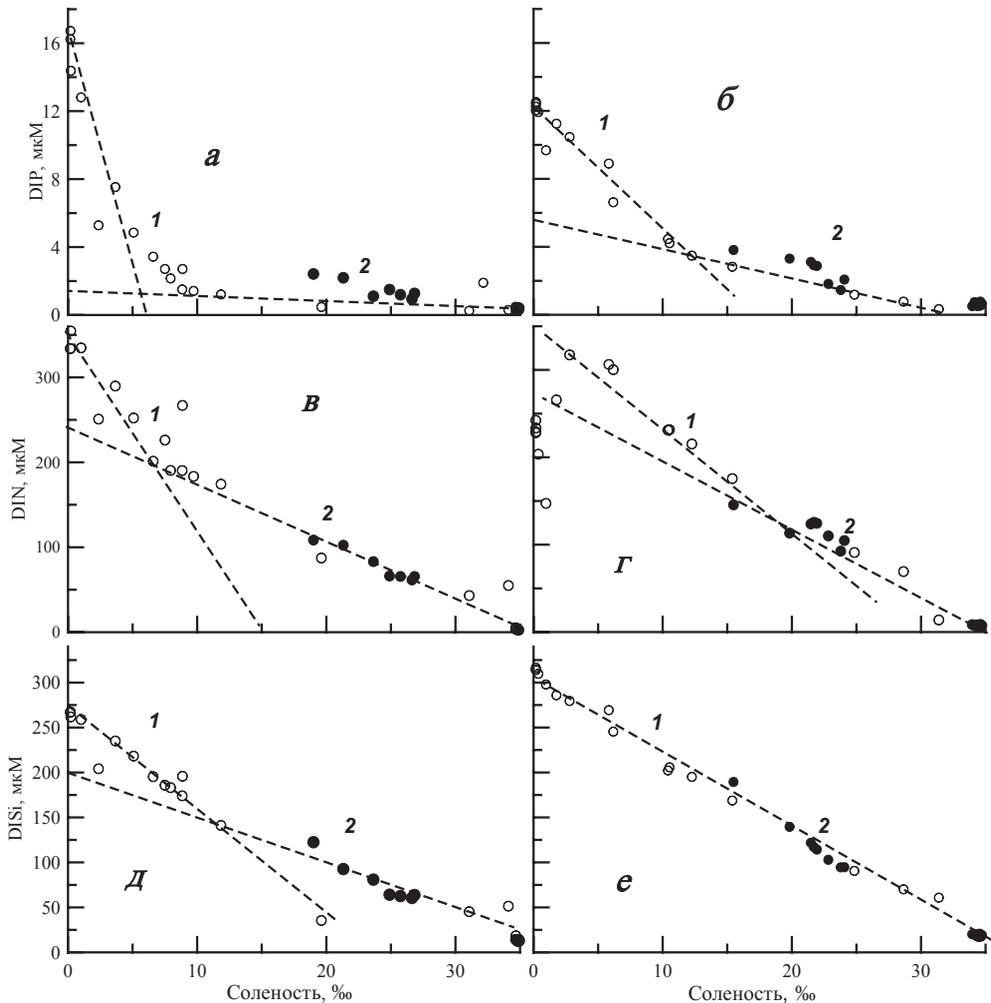


Рис. 7. Изменение концентрации DIP, DIN и DISi в зависимости от солёности в двух экспедициях в 2009 г. в поверхностном (1) и придонном (2) горизонтах: а, в, д — I экспедиция, 29.01–05.02; б, г, е — II экспедиция, 25.02–04.03

Fig. 7. DIP, DIN, and DISi along salinity gradient for two surveys in 2009: а, в, д — January 29 — February 5, 2009; б, г, е — February 25 — March 4, 2009; 1, 2 — at the surface and at the bottom, respectively

Наблюдалось также изъятие DIN:  $110 \text{ мкМ}$  ( $S \approx 7 \text{ ‰}$ ) и  $70 \text{ мкМ}$  ( $S \approx 17 \text{ ‰}$ ) соответственно в I и II экспедициях. Извлечение DIN также наблюдалось в основном во внутреннем эстуарии и частично в районе бара (рис. 1, б, в). Молярное отношение изъятых  $\Delta\text{DIN} : \Delta\text{DIP} = 7,3 : 1,0$  и  $\Delta\text{DIN} : \Delta\text{DIP} = 8,7 : 1,0$  в I и II экспедициях было почти вдвое ниже отношений Редфильда ( $\Delta\text{DIN} : \Delta\text{DIP} = 16 : 1$ ). В проведенных нами зимних экспедициях отношения  $\text{DIN} : \text{DIP}$  в речной воде были выше отноше-

Таблица 2

Извлечение биогенных элементов (DIN, DIP, DISi) фитопланктоном, оцененное на основании диаграмм (рис. 7), эквивалентное извлечение углерода (DIC) (по соотношению Редфильда), величина ПП в эстуарии р. Раздольной во время I и II съемок зимой 2009 г.

Table 2

Removal of nutrients (DIN, DIP, DISi) by phytoplankton (on the base of Fig. 7), equivalent removal of inorganic carbon (corresponded to Redfield ratio), and primary production in the Razdolnaya estuary for two surveys in winter 2009

| Съемка                           | Единица измерения           | $\Delta$ DIC | $\Delta$ DIN | $\Delta$ DIP | $\Delta$ DISi | Расход,<br>10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup> |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---|
| I съемка<br>29.01–05.02.2009 г.  | Ммоль/м <sup>3</sup>        | 1590         | 110          | 15           | 60            | 0,215                                     |
|                                  | Т/сут                       | 4,10         | 0,33         | 0,10         | 0,36          |   |
|                                  | ПП, мгС/м <sup>2</sup> день | 100–200      | 50–100       | 100–200      | 25–50         |   |
| II съемка<br>25.02–04.03.2009 г. | Ммоль/м <sup>3</sup>        | 850          | 70           | 8            | 25            | 0,350                                     |
|                                  | Т/сут                       | 3,600        | 0,340        | 0,086        | 0,250         |   |
|                                  | ПП, мгС/м <sup>2</sup> день | 90–180       | 50–100       | 90–180       | 20–40         |   |

ния Редфильда (16 : 1): DIN : DIP = 21 : 1 и DIN : DIP = 27 : 1 соответственно в I и II экспедициях 2009 г.; DIN : DIP = 66 : 1 в 2008 г.; DIN : DIP = 36 : 1 в 2010 г. (см. табл. 1). Заметное изъятие DISi наблюдалось лишь в I экспедиции (около 27 %), во II DISi проявлял поведение, близкое к консервативному (см. рис. 7, д, е).

В экспедиции 2008 г. (29.01–06.02) также наблюдалось изъятие из среды DIP и аммония, заметного изъятия DIN и DISi зарегистрировано не было (Звалинский и др., 2010). Неполное изъятие БВ в эстуарии при продуцировании ОВ свидетельствует о лимитировании ПП светом; не изъятая в эстуарии часть БВ изымается в открытой акватории залива за пределами эстуария.

В летний сезон обычно в эстуарии р. Раздольной все биогенные вещества извлекаются из среды полностью до достижения солености менее 25 ‰. При этом отношение извлечения  $\Delta$ DIN :  $\Delta$ DIP близко к отношению Редфильда или выше его (Звалинский и др., 2005, 2008а). Зимой в период ледостава отношение извлеченных БВ  $\Delta$ DIN :  $\Delta$ DIP  $\approx$  7–9, что существенно меньше 16 вследствие аномально высокой доли извлечения фосфатов. Одним из объяснений такой аномально высокой доли извлечения из среды фосфатов может быть участие сорбционных процессов (Spiteri et al., 2008).

В настоящей работе, а также в других зимних съемках (Звалинский и др., 2008б, 2010; Марьяш и др., 2010) нами не обнаружено «добавления» содержания биогенных веществ во внутреннем эстуарии р. Раздольной, что свидетельствует об отсутствии заметной деструкции ОВ в этот сезон. На основании данных о неконсервативном поведении фосфатов в летний сезон А.С. Важова и Ю.И. Зуенко (2015а, б) пришли к заключению, что во внутреннем эстуарии р. Раздольной преобладают процессы минерализации ОВ, тогда как во внешнем — продуцирование ОВ. Превалирование деструкции во внутреннем, а продукции во внешнем эстуарии нами было установлено ранее в июле 2001 г. во время проведения разреза через эстуарий р. Раздольной (Тищенко и др., 2005). А.С. Важова и Ю.И. Зуенко (2015а, б) оценили, что ПП для внешнего эстуария р. Раздольной может достигать 5 г С/м<sup>3</sup> день, в отличие от работы П.Я. Тищенко с соавторами (2005), где аналогичная оценка составляет около 250 мг С/м<sup>3</sup> день. Столь высокую величину ПП авторы объясняют добавлением биогенных веществ (в частности фосфатов) за счет деструкции ОВ во внутреннем эстуарии. Из текста статьи А.С. Важовой и Ю.И. Зуенко (2015б) не совсем ясно, весовое или молярное отношение между углеродом и фосфором (106 : 1) в соотношении Редфильда использовали авторы при проведении оценок. При использовании весового отношения оценка ПП может быть завышена в 2,6 раза. К неточности оценок могло привести то обстоятельство, что при формулировании балансовой модели смешения вод в эстуариях важным условием являются измерения в самых крайних точках эстуария — речной и морской («river and ocean end-members»; Boyle et al., 1974; Kaul, Froelich, 1984; Lohrenz et al., 1999). Именно между этими двумя точками диаграммы БВ–соленость проводится линия

консервативного смешения, по отношению к которой оценивается неконсервативность поведения биогенных веществ. Диаграммы БВ–соленость для р. Раздольной в работах А.С. Важовой, Ю.И. Зуенко (2015а, б) «обрываются» при соленостях 10, 12 и 18 ‰ соответственно для осени, весны и лета и поэтому являются «неполными» для анализа методами балансовой модели и недостаточно корректными для проведения оценок.

### Соотношение биогенных веществ при смешении вод

На рис. 7 видно, что по мере увеличения солености фосфаты из среды извлекаются непропорционально резко по сравнению с DIN и DISi. Очевидно, что отношение DIN : DIP должно увеличиваться с увеличением солености. Действительно, DIN : DIP в речной воде достаточно близко к соотношению Редфильда: DIN : DIP = 21 : 1 и DIN : DIP = 27 : 1 в I и II экспедициях 2009 г. При  $S \approx 30$  ‰ в первой экспедиции это отношение увеличивалось в 9 раз и достигало DIN : DIP  $\approx 180$  : 1, во второй — DIN : DIP  $\approx 90$  : 1 (рис. 8, а, б). Как видно, в обоих случаях на большей части эстуария (соленость  $S \approx 5$ –30 ‰) наблюдается резкий дефицит фосфатов.

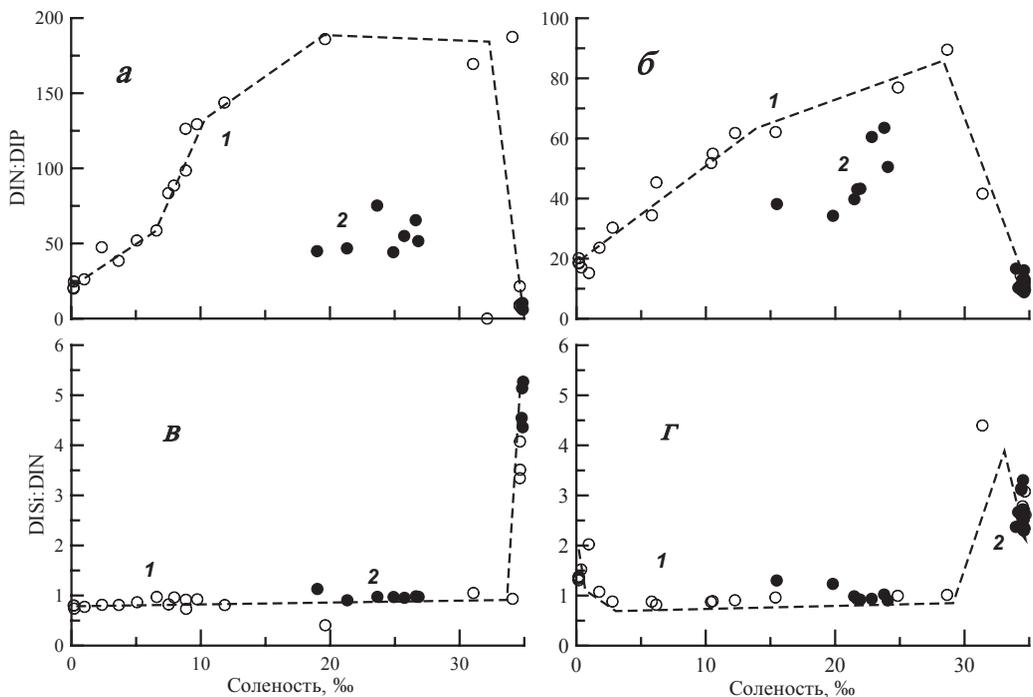


Рис. 8. Изменение отношений DIN : DIP (а, б) и DISi : DIN (в, г) в зависимости от солености в I (а, в) и II (б, г) экспедициях 2009 г. в эстуарии р. Раздольной: 1 — верхний горизонт; 2 — придонный горизонт

Fig. 8. Dependence of DIN : DIP (а, б) and DISi : DIN (в, г) ratios on salinity in the Razdolnaya estuary on January 29 — February 5, 2009 (а, в) and February 25 — March 4, 2009 (б, г): 1, 2 — at the surface and at the bottom, respectively

Во внешнем эстуарии эти отношения уменьшались до DIN : DIP = 6 : 1 и DIN : DIP = 9 : 1 в I и II экспедициях. В обоих случаях соотношение DISi : DIN  $\approx 0,7$ –1,1 и практически не изменялось в диапазоне солености от 2 до 33 ‰, что свидетельствует об отсутствии лимитирования ПП силикатами (Гершанович и др., 1990). Аналогичные изменения DIN : DIP в зависимости от солености наблюдались в зимней экспедиции 2008 г.: при  $S \approx 15$ –20 ‰ отношение достигало DIN : DIP  $\approx 160$  (Звалинский и др., 2010).

### Изменения содержания хлорофилла и кислорода при смешении речных и морских вод

Содержание главного фотосинтетического пигмента хлорофилла *a* и кислорода, как продуктов фотосинтеза, непосредственно отражает величину первичной продукции.

Совместное рассмотрение этих продукционных параметров среды позволяет оценить величину ПП акватории рассматриваемого эстуария.

Содержание Хл в поверхностном горизонте во внутреннем эстуарии вплоть до бара составляло  $C_{chl} \approx 2,0-2,5 \text{ мг м}^{-3}$  для обеих съемок 2009 г. (рис. 9, а, б). После бара при переходе во внешний эстуарий наблюдается резкое увеличение его содержания. На открытой акватории залива поверхностная концентрация Хл уменьшается и становится сопоставимой с его концентрацией в придонном горизонте. В придонном горизонте эстуария содержание Хл или несколько выше (I экспедиция) (рис. 9, а), или сравнимо с содержанием на поверхности (II экспедиция) (рис. 9, б).

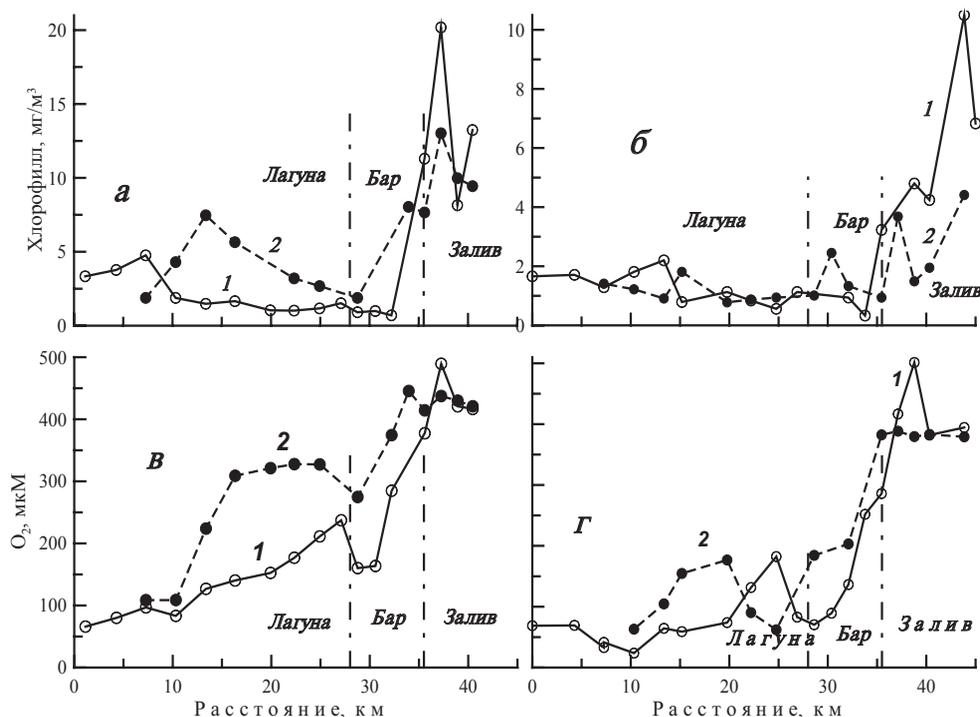


Рис. 9. Изменение содержания Хл (а, б) и кислорода (в, г) вдоль оси эстуария р. Раздольной во время I (а, в) и II (б, г) экспедиций 2009 г.: 1 — поверхность; 2 — придонный горизонт  
 Fig. 9. Chlorophyll concentration (а, б) and dissolved oxygen content (в, г) along the Razdolnaya estuary on January 29 — February 5, 2009 (а, в) and February 25 — March 4, 2009 (б, г). 1, 2 — at the surface and at the bottom, respectively

Очевидно, что низкое содержание хлорофилла в речной части эстуария обусловлено лимитированием ПП светом. Здесь (ст. 1) вода имеет повышенную мутность (см. рис. 3, б) и высокое содержание ГВ (Звалинский и др., 2008б), что обуславливает высокое значение суммарного коэффициента ослабления света в реке:  $k_d > 2,5 \text{ м}^{-1}$ ;  $z_{ph} < 2,0 \text{ м}$ . Кроме этого, вода в реке имеет низкую соленость и, следовательно, формируется более толстый лед, что дополнительно уменьшает освещенность подледной воды. На самом баре вода имеет повышенную мутность вследствие малой глубины и интенсивного взмучивания воды волнением (рис. 3, б), что приводит к падению концентрации Хл в начале бара (рис. 9, а, б). Высокий коэффициент ослабления света ( $k_d > 2,5 \text{ м}^{-1}$ ), низкое содержание Хл и высокое содержание БВ в совокупности однозначно свидетельствуют о лимитировании ПП светом в водной толще речной части эстуария.

Кислород обнаруживает поведение, близкое к поведению Хл: в поверхностном горизонте во время обеих съемок наблюдается низкое его содержание во внутреннем эстуарии вплоть до бара, после чего происходит быстрое увеличение содержания с последующим падением до уровня открытых вод (рис. 9, в, г). В придонном горизонте содержание  $O_2$  превышает его содержание на поверхности, превышение более выражено во время I съемки (рис. 9, в, г). Этот факт свидетельствует о том, что содержание  $O_2$  в

верхнем и придонном горизонтах формируется в значительной степени независимо: параметры верхнего горизонта определяются мутной речной водой с низким уровнем фотосинтеза, тогда как параметры придонного горизонта — свойствами морской воды, зашедшей в лагуну во время приливов, и смешением ее с речной водой. Вследствие весьма низкой интенсивности света в придонном горизонте лагуны фотосинтез не оказывает заметного влияния на концентрацию  $O_2$ .

Диаграммы рассеяния «хлорофилл–соленость» для обеих съемок у поверхности весьма близки между собой: низкое содержание Хл во внутреннем эстуарии ( $0,4\text{--}1,7\text{ мг/м}^3$ ) с незначительным его уменьшением при увеличении солености от 1 до 25 ‰ (рис. 10, а, б). Для обеих съемок характерно уменьшение содержания Хл в интервале 0–1 ‰. На всем интервале солености  $S = 1\text{--}25\text{ ‰}$  содержание Хл заметно не изменялось, при этом во время I съемки оно было почти вдвое выше ( $0,7\text{--}1,7\text{ мг/м}^3$ ), чем во время II съемки ( $0,4\text{--}1,0\text{ мг/м}^3$ ). При переходе через бар ( $S \geq 30\text{ ‰}$ ; см. рис. 1, б) содержание Хл в первом случае достигало  $20\text{ мг/м}^3$ , во втором —  $9\text{ мг/м}^3$  (рис. 10, а, б). Такая же картина распределения Хл наблюдалась и в 2008 г., но тогда максимальная его концентрация в районе бара была намного меньше —  $2,0\text{--}2,5\text{ мг/м}^3$  (Звалинский и др., 2010).

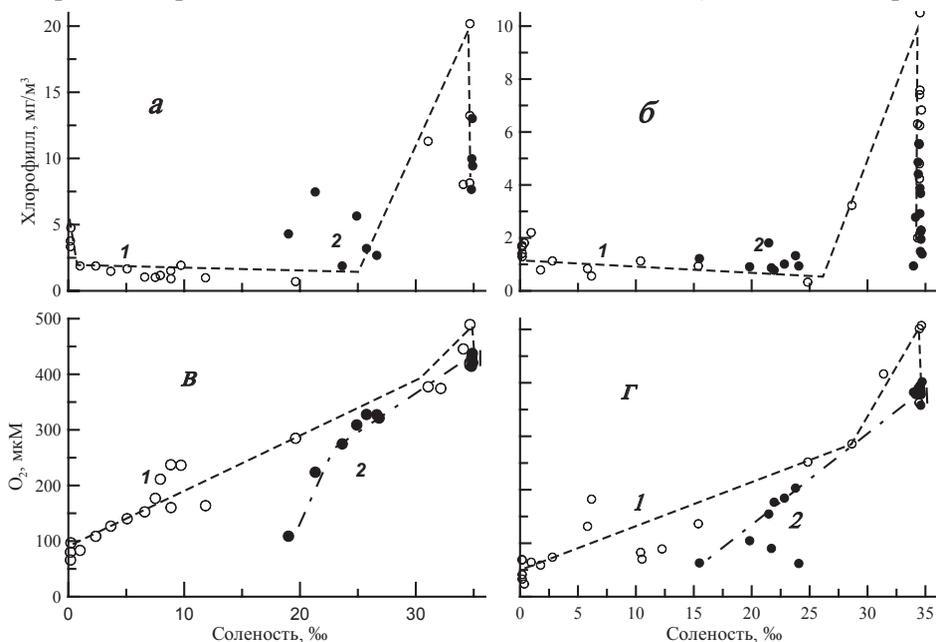


Рис. 10. Изменение содержания Хл (а, б) и кислорода (в, г) в зависимости от солености во время I (а, в) и II (б, г) экспедиций в 2009 г.: 1 и 2 — поверхностный и придонный горизонты

Fig. 10. Dependence of chlorophyll concentration (а, б) and dissolved oxygen content (в, г) on salinity on January 29 — February 5, 2009 (а, в) and February 25 — March 4, 2009 (б, г): 1, 2 — at the surface and at the bottom, respectively

Диаграммы «кислород–соленость» также были близкими для двух съемок: практически равномерное увеличение  $O_2$  с увеличением солености от 1,0 до 30,0 ‰, после чего в интервале 30,0–34,5 ‰ более интенсивное увеличение  $O_2$  (рис. 10, в, г). Как и в случае с хлорофиллом, во время I съемки уровень  $O_2$  в реке был почти вдвое выше (при  $S \approx 1,0\text{ ‰}$   $[O_2] \approx 95\text{ мкМ}$ ), чем во время II съемки (при  $S \approx 1,0\text{ ‰}$   $[O_2] \approx 50\text{ мкМ}$ ). Интенсивность увеличения содержания кислорода при увеличении солености в I съемке также была выше, чем во II (соответственно 9,8 и 7,7 мкМ на 1 ‰). Содержание  $O_2$  существенно возрастало в интервале  $S \approx 30,0\text{--}34,5\text{ ‰}$ , при этом, наоборот, во втором случае скорость нарастания была вдвое выше, чем в первом (22 и 44 мкМ на 1 ‰ соответственно в I и II случаях). Это различие обусловлено более благоприятными (световыми) условиями для фотосинтеза в реке и лагуне в I случае, чем во II. Вследствие этого в I случае содержание  $O_2$  увеличивалось быстрее и при солености  $S \approx 30\text{ ‰}$  достигало  $[O_2] \approx 390\text{ мкМ}$ , тогда как во II случае при той же солености оно было на

110 мкМ меньше —  $[O_2] \approx 280$  мкМ. Максимальные значения концентраций  $O_2$  были близкими: около  $[O_2] \approx 500$  мкМ (рис. 10, в, г).

Необходимо отметить, что зимой в лагуне и в области бара в 2006 и 2008 гг. были зарегистрированы высокие содержания Хл на нижней поверхности льда (которые в 2009 г. не измерялись): в слое воды содержалось менее 2,5 мг Хл/м<sup>2</sup>, тогда как на нижней поверхности льда — до 40,0 мг Хл/м<sup>2</sup> (Звалинский и др., 2008б, 2010).

### Первичная продукция

Скорость первичной продукции как мультисубстратного процесса может быть описана соотношением (Звалинский, 2006; Звалинский, Тищенко, в печати)

$$\frac{r_{IA} \cdot V}{1 - \frac{V}{I}} + \frac{r_{CA} \cdot V}{1 - \frac{V}{C}} + \frac{r_{NA} \cdot V}{1 - \frac{V}{N}} + \frac{r_{PA} \cdot V}{1 - \frac{V}{P}} = (1 - \gamma \cdot V), \quad (4)$$

где  $V = P/P^m$  — относительная скорость;  $P$  и  $P^m$  — скорость и максимальная скорость процесса;  $I = a[I]/K_I$ ;  $C = [C_e]/K_C$ ;  $N = [N]/K_N$ ;  $P = [P]/K_P$  — относительные (безразмерные) интенсивность света и концентрации субстратов (углерода, азота, фосфора) в единицах субстратных констант;  $[I]$ ,  $[C_e]$ ,  $[N]$  и  $[P]$  — абсолютные концентрации веществ;  $K_I$ ,  $K_C$ ,  $K_N$  и  $K_P$  — соответствующие субстратные константы, определяющие скорость извлечения элементов из среды; коэффициенты  $\gamma$  и  $r_{ik}$  — параметры, определяющие форму непрямоугольной гиперболы.

Как видно, величина ПП определяется как интенсивностью света, так и концентрацией совокупности биогенных веществ. Первичное продуцирование, как правило, протекает при лимитировании светом или каким-либо БВ, в этом случае скорость  $V$  (соотношение 4) становится зависимой только от одного лимитирующего фактора среды — света, азота или фосфора:

$$\text{а) } \frac{r_{IA} \cdot V}{1 - V/I} = 1 - \gamma_I \cdot V; \quad \text{б) } \frac{r_{NA} \cdot V}{1 - V/N} = 1 - \gamma_N \cdot V; \quad \text{в) } \frac{r_{PA} \cdot V}{1 - V/P} = 1 - \gamma_P \cdot V. \quad (5)$$

Соотношения (5) представляют собой уравнения непрямоугольной гиперболы, при этом параметр непрямоугольности для реальных световых или углекислотных кривых (а также для зависимости от концентрации других биогенных элементов) составляет  $\gamma_i \approx 0,95$ .

Скорости извлечения элементов определяются соотношениями:

$$\text{а) } \frac{d[C]}{dt} = K_C \cdot V; \quad \text{б) } \frac{d[N]}{dt} = K_N \cdot V; \quad \text{в) } \frac{d[P]}{dt} = K_P \cdot V. \quad (6)$$

Очевидно, что скорость ПП определяется как скоростью фиксации углерода (углекислоты), так и скоростью изъятия любого из биогенных элементов.

Распространенной оценкой ПП на основании данных о световых условиях является оценка с использованием ассимиляционного числа  $An$  или  $P^b$  (удельная продукция на единицу хлорофилла, мг С/мг Хл час) (Platt, 1986; Behrenfeld, Falkowski, 1997a, b; Звалинский и др., 2006):

$$P = 0,66 An C_{ph} T_d \text{ мг С/м}^2 \text{ день}. \quad (7)$$

Известен другой вариант оценки ПП, без использования  $An$ , который основан на самых общих представлениях об эффективности утилизации поглощенной световой энергии (Platt, 1986; Behrenfeld, Falkowski, 1997a):

$$P = \psi C_{ph} L_D, \text{ г С/м}^2 \text{ день}. \quad (8)$$

В этом случае продукция определяется содержанием хлорофилла в столбе воды  $C_{ph}$  (г Хл/м<sup>2</sup>), долгой дня  $T_d$  (час) или дневной дозой падающего на поверхность света  $L_D$  (моль квантов/м<sup>2</sup> день). Множитель  $\psi$  — параметр эффективности утилизации энергии света.

Анализ многочисленных данных показал, что величина параметра эффективности утилизации света  $\psi$  для разных морских акваторий изменяется примерно в два раза и находится в пределах  $\psi = 0,29-0,60$  г С м<sup>2</sup>/г Хл моль квантов. Макс-

симальная величина  $\psi = 0,6$  г С м<sup>2</sup>/г Хл моль квантов была зарегистрирована в эстуарных и прибрежных водах. Для открытых морских акваторий она составляет около  $\psi = 0,5$  г С м<sup>2</sup>/г Хл моль квантов. Приведенные подходы к оценке ПП на примере самых различных акваторий многократно анализировались в литературе (Harding et al., 2002; Forget et al., 2007; Marra et al., 2007), причем были получены весьма близкие результаты как по форме выражения величины ПП (соотношения 7–8), так и по абсолютной величине параметров утилизации света.

Анализ более 1000 профилей ПП привел к заключению, что средняя величина  $An$  незначительно различается для разных морских акваторий и составляет  $An \approx 5$  мг С/мг Хл час, а величина коэффициента  $\psi$  в уравнении (7) изменяется в пределах 0,45–0,66 г С м<sup>2</sup>/г Хл моль квантов (Platt, 1986; Behrenfeld, Falkowski, 1997a, b).

### **Оценки ПП эстуария на основании данных о световых условиях**

Приведенные данные по световым условиям в эстуарии р. Раздольной с использованием общего подхода к формированию ПП (соотношение 8) позволяют провести общие оценки величины ПП эстуария в период ледостава.

В речной части эстуария (ст. 1–4; см. рис. 6, а) толщина фотического слоя составляет  $z_p = 1,5–2,0$  м; содержание Хл в этот период в речной части было в пределах 1–4 мг/м<sup>3</sup> (рис. 10, а, б) (Звалинский и др., 2008б; Марьяш и др., 2015), тогда  $C_{ph} \approx 2–8$  мг/м<sup>2</sup>. Используя величину  $\psi \approx 0,5$  г С м<sup>2</sup>/г Хл моль квантов для зимнего сезона, для середины февраля (дневная доза света  $L_D \approx 20$  моль квантов/м<sup>2</sup> день) из соотношения (8) получаем

$$P = \psi C_{ph} L_D \approx 0,5 (2 - 8) 20 = 20 - 80 \text{ мг С/м}^2 \text{ день.} \quad (9)$$

Таким образом, при отсутствии ледяного покрова в период декабрь–февраль ПП в речной части эстуария в соответствии с соотношением (9) имеет весьма низкое значение вследствие светового лимитирования, обусловленного низкой интенсивностью света и низкой прозрачностью речной воды.

Во время ледостава величина ФАР непосредственно подо льдом при отсутствии снега составляла от 6,5 до 30,0 % от падающей на поверхность льда, т.е. дополнительно уменьшалась в 3–15 раз по сравнению с условиями открытой воды (Звалинский и др., 2008б). Вследствие светового лимитирования ПП при ледоставе ее величина во внутреннем эстуарии будет во столько же раз ниже, т.е. 5–30 мг С/м<sup>2</sup> день. При наличии снега дневная доза ФАР дополнительно уменьшается примерно на порядок, величина ПП становится близкой к 0. Учет вклада фитопланктона нижнего слоя льда может увеличить продукцию на 200–300 мг С/м<sup>2</sup> день. Непосредственно за пределами бара, в Амурском заливе, (ст. 11–12) толщина фотического слоя достигает  $z_p = 8–12$  м (см. рис. 6, б), концентрация Хл имеет близкие значения к внутренней части эстуария (2–5 мг/м<sup>3</sup>), а в фотическом слое достигает 10–30 мг/м<sup>2</sup>. При тех же значениях параметра эффективности  $\psi$  величина продукции может быть существенно выше:

$$P = \psi C_p L_D \approx 0,5 (10 - 30) 20 = 100 - 300 \text{ мг С/м}^2 \text{ день.}$$

За счет льда интенсивность света здесь может уменьшиться в 3–4 раза, соответственно и величина ПП уменьшится до 25–100 мг С/м<sup>2</sup> день. Данные оценки проведены для середины февраля ( $L_D \approx 20$  моль квантов/м<sup>2</sup> день). В середине марта дневная доза света  $L_D$  увеличивается примерно в полтора раза, соответственно возрастает и величина ПП (до 40–150 мг С/м<sup>2</sup> день), т.е. соответствует продукции открытых акваторий залива в осенний период при отсутствии льда (Звалинский и др., 2006).

Оценки с использованием измеренного нами ранее ассимиляционного числа (соотношение 7) в зимний сезон ( $An \approx 4$  мг С/мг Хл час)\* для речной части эстуария при отсутствии ледяного покрова для 31 января дают результат  $P \approx 0,66 \cdot 4 (2–8) 9,6 = 50–200$  мг С/м<sup>2</sup> день.

Через месяц (28 февраля) за счет увеличения высоты стояния солнца и продолжительности дня ПП может возрасти до 60–280 мг С/м<sup>2</sup> день. Во время ледостава величина

\* Экологическое нормирование и рациональная эксплуатация прибрежных акваторий Приморья: отчет о НИР / ТОИ ДВО РАН. № 01.20.00 06073. Владивосток, 2000. 28 с.

ФАР непосредственно подо льдом за счет ее поглощения льдом и снегом уменьшается в 3–15 раз. Во столько же раз может уменьшиться и величина ПП.

За пределами бара в Амурском заливе (ст. 11–12) при содержании Хл в фотическом слое  $C_{ph} \approx 10\text{--}30 \text{ мг/м}^2$  величина продукции может составить:  $P \approx 0,66 \cdot 4 (20\text{...}60) 9,6 = 250\text{--}750 \text{ мг С/м}^2 \text{ день}$ . С учетом ледяного покрова эта величина ПП может уменьшиться до  $25\text{--}250 \text{ мг С/м}^2 \text{ день}$ . Такие достаточно высокие значения ПП для января-февраля во внешней эстуарии обусловлены высокой прозрачностью воды и благоприятным снабжением биогенными веществами.

Летом долгота дня увеличивается в полтора раза (до 15 ч), однако в Амурском заливе существенно падает прозрачность воды и наблюдается лимитирование биогенными веществами, вследствие чего ПП не превышает  $1\text{--}2 \text{ г С/м}^2 \text{ день}$ . Однако в период паводков при благоприятных условиях снабжения БВ, как в августе 2005 г., ПП в Амурском заливе может достигать значений  $6 \text{ г С/м}^2 \text{ день}$  (Звалинский и др., 2008а).

Высокие значения ПП в период ледостава могут наблюдаться и во внутреннем эстуарии. Так, 13.02.2008 г. в районе ст. 1 (ст. 8; Михайлик и др., 2011) зарегистрирована исключительно высокая концентрация кислорода (более 800 мкМ) и концентрация Хл (более  $35 \text{ мг/м}^3$ ). Оцененная величина ПП (соотношение 7) могла составить до  $1,5 \text{ г С/м}^2 \text{ день}$ . Резкое различие данных экспедиций 2009 г. и Т.А. Михайлик с соавторами (2011) объясняется тем, что последние проводили наблюдения в районе ст. 1 (см. рис. 1) в правом рукаве р. Раздольной, где во время съемки снег отсутствовал, а лед был прозрачным. В настоящей работе наблюдения проводились в левом рукаве реки, где в это время был толстый слой снега и вследствие этого весьма низкая интенсивность света в воде. Наблюдаемая 13.02.2008 г. в районе ст. 1 (Михайлик и др., 2011) высокая ПП объясняет высокое отношение  $\text{DIN} : \text{DIP} \approx 270 : 1$  большой скоростью изъятия DIP по сравнению с другими БВ.

#### ***Оценка величины ПП в эстуариях по извлечению биогенных веществ***

Оценка величины ПП в эстуариях по извлечению биогенных веществ проводилась исследователями уже в ранних работах по моделированию смешения вод в эстуариях (см. соотношения (4–6); Boyle et al., 1974; Officer, 1979; Lohrenz et al., 1999; Звалинский и др., 2005). Общий поток извлекаемых фитопланктоном веществ был оценен по диаграмме соленость — биогенное вещество (см. рис. 7) и представлен в табл. 2. Как видно на рис. 9, увеличение содержания Хл и  $\text{O}_2$  происходит в обоих случаях на протяжении около 10 км. При ширине продукционной части акватории 2–4 км ее площадь составит  $20\text{--}40 \text{ км}^2$ . Величина ПП на единицу площади получается делением изъятых эквивалентного количества углерода  $\Delta\text{DIC}$  на площадь (табл. 2). Полученные значения ПП по извлечению БВ относятся к «новой» продукции, тогда как «полная» ПП обычно примерно вдвое выше, поскольку значительная часть ПП производится за счет регенерации БВ (Elskens et al., 1999). «Новая» ПП составит:  $P \approx 4,0 \cdot 10^6 / ((20\text{...}40) \cdot 10^6) = 100\text{--}200 \text{ мг С/м}^2 \text{ день}$ . Полная средняя по акватории ПП будет примерно вдвое выше —  $P \approx 200\text{--}400 \text{ мг С/м}^2 \text{ день}$ . Существенно, что эти результаты оценок ПП по извлечению БВ не зависят от наличия или отсутствия ледяного покрова. Также проводилась оценка ПП/деструкции на основе временной изменчивости параметров карбонатной системы (Johnson et al., 1979; Тищенко и др., 2005). Применительно к эстуарию р. Раздольной показано доминирование деструкции в речной части эстуария по всей толще вод. Во внешней части эстуария до глубины 5–6 м доминируют продукционные процессы, величина «новой продукции» достигает в летний сезон  $240 \text{ мг С/м}^3 \text{ сут}$  (Тищенко и др., 2005).

Результаты оценок ПП по извлечению БВ из среды (табл. 2) показывают, что максимальные значения ПП получаются из оценки, основанной на извлечении фосфатов, а минимальные величины — из оценок по извлечению силикатов. Аналогичный подход для летнего сезона 2001 г. дал противоположные результаты: оценки по фосфатам имели минимальную величину, по силикатам — максимальную (Звалинский и др., 2005). Одним из возможных объяснений таких противоположных выводов для лета и зимы может быть большой вклад сорбции/десорбции фосфатов (Spiteri et al., 2008) в их баланс в зимний период.

Таким образом, оцененная с использованием различных подходов величина ПП эстуария р. Раздольной в период ледостава имеет близкие значения. Во внутреннем эстуарии подо льдом ПП не превышает 20 мг С/м<sup>2</sup> день, а подо льдом и снегом — близка к 0. Столь низкая продукция обусловлена низкой интенсивностью света за счет высокой мутности воды и ослабления света льдом и снегом. В период ледостава во внутреннем эстуарии р. Раздольной ПП всегда лимитирована светом.

В лагуне, в районе бара и во внешнем эстуарии вследствие оседания взвеси вода становится значительно более прозрачной, лед также имеет более высокую прозрачность, в несколько раз увеличивается ФАР подо льдом. В фотическом слое почти на порядок увеличивается содержание Хл, на порядок также возрастает и величина ПП: до 200–500 мг С/м<sup>2</sup> день. Близкие результаты были получены зимой 2006 и 2008 гг. (Звалинский и др., 2008б, 2010). Однако и во внешнем эстуарии ПП также остается лимитированной светом, что подтверждается неполным извлечением БВ в эстуарии. Большая часть БВ извлекается из среды за пределами эстуария. В период ледостава в целом речной вынос БВ в эстуарий оказывается в 15–50 раз ниже, чем летом, примерно во столько же раз зимой ниже и общая ПП по сравнению с другими сезонами. Так, если зимой 2009 г. из среды в эстуарии извлекалось около 0,35 т DIN в сутки, то извлечение азота в июле 2001 г. составляло 2,5–6,5 т в сутки, в июле 2008 — 15,0 т, а в августе 2005 г. — 25,0 т в сутки (табл. 2) (Звалинский и др., 2005, 2008б; Михайлик и др., 2011).

### Выводы

В зимний сезон (январь-февраль) расход воды в р. Раздольной в 20–50 раз ниже, чем летом, соответственно этому выносы БВ рекой в период ледостава примерно во столько же раз ниже, чем в летний период.

Зимой в декабре-январе дневная доза света примерно втрое меньше максимальной, во второй половине февраля и марте количество света сопоставимо с другими сезонами. При отсутствии ледяного покрова только в декабре-январе можно ожидать светового лимитирования ПП, в остальное время свет не должен ее лимитировать. Ледяной покров уменьшает интенсивность света в 3–15 раз, что однозначно делает свет лимитирующим ПП фактором.

Речные воды имеют коэффициент ослабления света  $k_d > 2,5 \text{ м}^{-1}$  и фотический слой  $z_{ph} < 2,0 \text{ м}$ , что обусловлено мутностью воды и высоким содержанием в ней гуминовых веществ. Это обуславливает крайне низкую ПП во внутреннем эстуарии: при наличии льда и снега ПП близка к 0.

Для периода ледостава характерно непропорционально интенсивное изъятие из среды DIP по сравнению с DIN (по сравнению с летом и соотношением Редфильда). Эта особенность приводит к резкому повышению отношения DIN : DIP (до DIN : DIP  $\approx$  200) в районе бара. Объяснением этой особенности зимой может служить добавление к продукционным процессам сорбции/десорбции фосфатов.

Концентрация Хл практически не изменяется в пределах солености 0–25 ‰ (до района бара). В районе бара происходит резкое возрастание содержания Хл, что свидетельствует об увеличении ПП.

Содержание O<sub>2</sub> линейно увеличивается от 80–100 мкМ при S  $\approx$  0 ‰ (река) до 300–350 мкМ при S  $\approx$  30 ‰ (бар), что свидетельствует о поведении кислорода во внутреннем эстуарии, близком к консервативному. Непосредственно после бара происходит более резкое возрастание содержания O<sub>2</sub>, также свидетельствующее об увеличении ПП.

Анализ световых условий в эстуарии р. Раздольной в период ледостава с учетом мутности воды показывает, что продукционные процессы в этот период протекают при существенном лимитировании светом и, следовательно, определяются количеством ФАР.

Оценки величины ПП в эстуарии в период ледостава на основании данных о световых условиях и данных об извлечении биогенных элементов дали близкие результаты: во внутреннем эстуарии подо льдом ПП не превышает 20 мг С/м<sup>2</sup> день, а подо льдом и снегом — близка к 0; во внешнем эстуарии вода и лед становятся более прозрачными,

вследствие чего величина ПП возрастает до 200–500 мг С/м<sup>2</sup> день. Общая продукция эстуария р. Раздольной в период ледостава примерно на два порядка ниже, чем летом: зимой 2009 г. из среды извлекалось около 0,35 т азота в сутки, тогда как извлечение азота летом составляло от 2,50 до 35,0 т в сутки.

Определенный вклад в формирование органического вещества вносят ледовые формы фитопланктона, ПП которых может составить до 100 мг С/м<sup>2</sup> день.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 08-05-00696-а, 15-05-03796-а и программы «Дальний Восток» (№ 15-1-1-010).*

### Список литературы

**Бартенева О.Д., Полякова Е.А., Русин Н.П.** Режим естественной освещенности на территории СССР : моногр. — Л. : Гидрометеиздат, 1971. — 239 с.

**Буренков В.И., Васильков А.П.** Термины и определения // Оптика океана. — М. : Наука, 1983. — Т. 1. — С. 6–18.

**Буренков В.И., Ведерников В.И., Ершова С.В. и др.** Использование данных спутникового сканера цвета океана SEAWIFS для оценки биооптических характеристик вод Баренцева моря // Океанол. — 2001. — Т. 41, № 4. — С. 485–492.

**Важова А.С., Зуенко Ю.И.** Особенности распределения биогенных элементов вдоль градиента солёности в эстуариях рек Суходол и Раздольная (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2015а. — Т. 180. — С. 226–235.

**Важова А.С., Зуенко Ю.И.** Оценка первичной продукции в эстуариях рек Раздольная и Суходол (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2015б. — Т. 182. — С. 132–143.

**Гершанович Д.Е., Елизаров А.А., Сапожников В.В.** Биопродуктивность океана : моногр. — М. : ВО Агропромиздат, 1990. — 238 с.

**Ерлов Н.Г.** Оптика моря : моногр. — Л. : Гидрометеиздат, 1980. — 248 с.

**Звалинский В.И.** Формирование первичной продукции в море // Изв. ТИНРО. — 2006. — Т. 147. — С. 276–302.

**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. // Океанол. — 2006. — Т. 146. — С. 27–37.

**Звалинский В.И., Марьяш А.А., Стоник И.В. и др.** Продукционные и гидрохимические характеристики льда, подледной воды и донных осадков эстуария реки Раздольной (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // Биол. моря. — 2010. — Т. 36, № 3. — С. 186–195.

**Звалинский В.И., Недашковский А.П., Сагалаев С.Г. и др.** Биогенные элементы и первичная продукция в эстуарии реки Раздольной (Амурский залив Японского моря) // Биол. моря. — 2005. — Т. 31, № 2. — С. 107–116.

**Звалинский В.И., Тищенко П.П., Тищенко П.Я. и др.** Результаты съемки гидрохимических и продукционных параметров акватории Амурского залива в период паводка реки Раздольной в августе 2005 года // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. — М. : ГЕОС, 2008а. — С. 199–229.

**Звалинский В.И., Марьяш А.А., Тищенко П.Я., Швецова М.Г.** Хлорофилл и биогенные элементы в эстуарии реки Раздольной в период ледостава 2006–2007 гг. // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. — М. : ГЕОС, 2008б. — С. 184–199.

**Звалинский В.И., Тищенко П.Я.** Биогенные элементы в эстуариях. Поведение и биогеохимия // Состояние морских экосистем, находящихся под влиянием речного стока. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — С. 89–124.

**Звалинский В.И., Тищенко П.Я.** Моделирование фотосинтеза и роста морского фитопланктона // Океанол. (в печати).

**Марьяш А.А., Ходоренко Н.Д., Звалинский В.И., Тищенко П.Я.** Органический углерод в эстуарии реки Раздольная (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // Геохимия. — 2015. — № 8. — С. 1–9.

**Марьяш А.А., Ходоренко Н.Д., Звалинский В.И., Тищенко П.Я.** Хлорофилл, гуминовые вещества и органический углерод в эстуарии реки Раздольной в период ледостава // Вестн. ДВО РАН. — 2010. — № 6. — С. 44–51.

**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.

- Одум Ю.** Экология : моногр. — М. : Мир, 1986. — Т. 1. — 328 с.; Т. 2. — 376 с.
- Пугач С.П., Пипко И.И.** Динамика растворенного окрашенного органического вещества на шельфе Восточно-Сибирского моря // Докл. РАН. — 2012. — Т. 447, № 6. — С. 671–674.
- Раймонт Дж.** Планктон и продуктивность океана : моногр. Т. 1 : Фитопланктон. — М. : Агропромиздат, 1983. — 568 с.
- Тищенко П.Я., Вонг Ч.Ш., Волкова Т.И. и др.** Карбонатная система эстуария реки Раздольной (Амурский залив Японского моря) // Биол. моря. — 2005. — Т. 31. — С. 51–60.
- Behrenfeld M.J., Falkowski P.G.** Photosynthetic rates derived from satellite based chlorophyll concentration // Limnol. and Oceanogr. — 1997a. — Vol. 42. — P. 1–20.
- Behrenfeld M.J., Falkowski P.G.** A consumer's guide to phytoplankton primary production models // Limnol. and Oceanogr. — 1997b. — Vol. 42. — P. 1479–1491.
- Boyle E.R., Collier A.T., Dengler J.M. et al.** On the chemical mass-balance in estuaries // Geochim. et Cosmochim. Acta. — 1974. — Vol. 38. — P. 1719–1728.
- Elskens M., Goeyens L., Dehairs F. et al.** Improved estimation f-ratio in natural phytoplankton assemblages // Deep-Sea Res. — 1999. — Vol. 46. — P. 1793–1808.
- Forget M.-H., Sathyendranath S., Platt T. et al.** C. Extraction of photosynthesis-irradiance parameters from phytoplankton production data: demonstration in various aquatic systems // J. Plankton Res. — 2007. — Vol. 29(3). — P. 249–262.
- Gao Y., Mucci A.** Individual and competitive adsorption of phosphate and arsenate on goethite in artificial seawater // Chemical Geology. — 2003. — Vol. 199. — P. 91–109.
- Harding Jr.L.W., Mallonee M.E., Perry E.S.** Toward a predictive understanding of primary productivity in a temperate, partially stratified estuary // Estuar. Coast. Shelf Sci. — 2002. — Vol. 55. — P. 437–463.
- Johnson K.S., Pitkowicz R.M., Wong C.S.** Biological production and the change of oxygen and carbon dioxide across the sea surface in Stuart Channel, British Columbia // Limnol. and Oceanogr. — 1979. — Vol. 24. — P. 474–485.
- Kaul L.W., Froelich P.N., Jr.** Modeling estuarine nutrient geochemistry in a simple system // Geochim. et Cosmochim. Acta. — 1984. — Vol. 48. — P. 1417–1433.
- Kirk J.T.** The nature and measurement of the light environment in the ocean // Primary production and biogeochemical cycles in the sea. — N.Y. : Plenum Press, 1992. — P. 9–29.
- Lohrenz S.E., Fahnenstiel G.L., Redalje D.G. et al.** Nutrients, irradiance, and mixing as factors regulating primary production in coastal waters impacted by the Mississippi River plume // Continental Shelf Res. — 1999. — Vol. 19. — P. 1113–1141.
- Marra J., Trees C.C., O'Reily J.E.** Phytoplankton pigment absorption: a strong predictor of primary productivity in the surface ocean // Deep-Sea Res. — 2007. — Vol. 54, pt I. — P. 155–163.
- Officer C.B.** Discussion of the Behavior of Nonconservative Dissolved Constituents in Estuaries // Estuar. Coast. Mar. Sci. — 1979. — Vol. 9. — P. 91–94.
- Platt T.** Primary production of the ocean water column as a function of surface light intensity: algorithms for remote sensing // Deep-Sea Res. — 1986. — Vol. 33, № 2. — P. 149–163.
- Spiteri C., Van Cappellen P., Regnier P.** Surface complexation effects on phosphate adsorption to ferric iron oxyhydroxides along pH and salinity gradients in estuaries and coastal aquifers // Geochim. et Cosmochim. Acta. — 2008. — Vol. 72. — P. 3431–3445.
- Turner R.E., Rabalais N.N., Nan Z.Z.** Phytoplankton biomass, production and growth limitations on the Huanghe (Yellow) River continental shelf // Continental Shelf Res. — 1990. — Vol. 10. — P. 545–571.
- Xiuren N., Vaulot D., Zhensheng L., Zilin L.** Standing stock and production of phytoplankton in the estuary of the Changjiang (Yangtse) River and the adjacent East China Sea // Mar. Ecol. Progr. Ser. — 1988. — Vol. 49. — P. 141–150.

*Поступила в редакцию 29.12.15 г.*