

Научная статья

УДК 550.42

DOI: 10.31857/S0869769825020051

EDN: GFCEDP

## Изменчивость биогеохимического сигнала терригенного материала в нижнем течении и эстуарии реки Амур в годы с различными условиями формирования весеннего половодья

О.В. Дударев✉, А.Н. Чаркин, Д.В. Черных, А.С. Рубан, И.И. Пипко,  
С.П. Пугач, В.А. Дубина, И.П. Семилетов

*Олег Викторович Дударев*

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

Владивосток, Россия

Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей

им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТех,  
Южно-Сахалинск, Россия

Томский государственный университет, Томск, Россия

dudarev@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9432-8992>

*Александр Николаевич Чаркин*

кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

Владивосток, Россия

charkin@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9273-9950>

*Денис Вячеславович Черных*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

Владивосток, Россия

Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей

им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТех,  
Южно-Сахалинск, Россия

Томский государственный университет, Томск, Россия

denis.chernykh.vl@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6814-7100>

*Алексей Сергеевич Рубан*

кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Томский политехнический университет, Томск, Россия

ruban@tpu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5852-8201>

*Ирина Ивановна Пипко*

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
Владивосток, Россия  
Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей  
им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТЕХ,  
Южно-Сахалинск, Россия  
irina@poi.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2480-9563>

*Светлана Петровна Пугач*

кандидат географических наук, старший научный сотрудник  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
Владивосток, Россия  
Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей  
им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТЕХ,  
Южно-Сахалинск, Россия  
pugach@poi.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0163-043X>

*Вячеслав Анатольевич Дубина*

кандидат географических наук, заведующий лабораторией  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
Владивосток, Россия  
dubina@poi.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3273-8977>

*Игорь Петрович Семилетов*

член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий лабораторией  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
Владивосток, Россия  
Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей  
им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТЕХ,  
Южно-Сахалинск, Россия  
Томский государственный университет, Томск, Россия  
ipsemiletov@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-3012-4739>

**Аннотация.** Цель данной работы – изучение межгодовой изменчивости литодинамических и биогеохимических характеристик взвешенного материала (SPM) на 884 км трансекте нижнее течение–эстуарий р. Амур в Охотском и Японском морях. Наблюдения выполнены в середине июня 2005 и 2006 гг. Водность и условия мобилизации терригенного материала в водосборе в периоды исследований кардинально различались. Были охвачены фазы наиболее высокого уровня половодья (2005 г.) и наинизшего межлетнего уровня Амура. Исследовались распределение SPM, взвешенного органического углерода (POC), общего азота (TN), изотопов углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) и азота ( $\delta^{15}\text{N}$ ). Мы не обнаружили в 2005 и 2006 гг. резких колебаний содержания SPM в нижнем течении Амура. Однако они проявились в морских сегментах трансекты – в Амурском лимане, в охотоморском и япономорском сегментах эстуария. Первопричинами изменений явились физико-химические преобразования SPM на фоне роста солёности и волновая ремобилизация донных осадков. Последняя наиболее ярко проявилась в 2006 г., когда уровень воды в речном сегменте эстуария и в Амурском лимане был низким.

**Ключевые слова:** река Амур, эстуарий, взвешенный материал, взвешенный органический углерод, изотопы углерода и азота

**Для цитирования:** Дударев О.В., Чаркин А.Н., Черных Д.В., Рубан А.С., Пипко И.И., Пугач С.П., Дубина В.А., Семилетов И.П. Изменчивость биогеохимического сигнала терригенного материала в нижнем течении и эстуарии реки Амур в годы с различными условиями формирования весеннего половодья // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 57–75.  
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020051>

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Программы Приоритет-2030 и гранта FFFF-2024-0004 Сахалинского государственного университета–СахТех, а также госзаданий ТОИ ДВО РАН (темы № 124022100083-1, № 12402210081-7, № 124022100074-9).

Original article

# Spring freshet fluxes of terrigenous matter from Amur River to the estuary in surrounding Okhotsk and Japan Seas

O.V. Dudarev, A.N. Charkin, D.V. Chernykh, A.S. Ruban, I.I. Pipko, S.P. Pugach, V.A. Dubina, I.P. Semiletov

*Oleg V. Dudarev*

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Chief Researcher  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,  
Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
Tomsk State University, Tomsk, Russia  
dudarev@poi.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9432-8992>

*Alexander N. Charkin*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Head of Laboratory  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
charkin@poi.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9273-9950>

*Denis V. Chernykh*

Candidate of Sciences in Technique, Senior Researcher  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,  
Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
Tomsk State University, Tomsk, Russia  
denis.chernykh.vl@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-6814-7100>

*Alexey S. Ruban*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Associate Professor  
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia  
ruban@tpu.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5852-8201>

*Irina I. Pipko*

Candidate of Sciences in Geography, Leading Researcher  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,  
Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
irina@poi.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2480-9563>

*Svetlana P. Pugach*

Candidate of Sciences in Geography, Senior Researcher  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,  
Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
pugach@poi.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0163-043X>

*Vyacheslav A. Dubina*

Candidate of Sciences in Geography, Head of Laboratory

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

dubina@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3273-8977>

*Igor P. Semiletov*

Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences in Geography, Head of Laboratory

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,

Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Tomsk State University, Tomsk, Russia

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

ipsemiletov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3012-4739>

**Abstract.** The objective of this work is to study the interannual variability of lithodynamic and biogeochemical characteristics of suspended matter (SPM) along the 884 km transect “lower reaches– estuary of the Amur River in the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan”. Observations were carried out in mid-June 2005 and 2006. The spring flood during the study periods differed dramatically in water content and conditions for mobilization of terrigenous material in the catchment area. Thus, the phases of the culmination of the highest flood level (2005) and the culmination of the lowest low-water level of the Amur were covered. The distribution of SPM, suspended organic carbon (POC), total nitrogen (TN), carbon isotopes ( $\delta^{13}\text{C}$ ) and nitrogen ( $\delta^{15}\text{N}$ ) were studied. We did not find any sharp fluctuations in the SPM content in the lower reaches of the Amur in 2005 and 2006. However, they manifested themselves in the marine segments of the transect – in the Amur Estuary, in the Sea of Okhotsk and Sea of Japan segments of the estuary. The primary cause of the changes were the physicochemical transformations of SPM against the background of increasing salinity and wave remobilization of bottom sediments. The latter was most clearly manifested in 2006, when the water level in the river segment of the estuary and in the Amur Estuary was low.

**Keywords:** Amur River, estuary, suspended particulate matter, particulate organic carbon, carbon and nitrogen isotopes

**For citation:** Dudarev O.V., Charkin A.N., Chernykh D.V., Ruban A.S., Pipko I.I., Pugach S.P., Dubina V.A., Semiletov I.P. Spring freshet fluxes of terrigenous matter from Amur River to the estuary in surrounding Okhotsk and Japan Seas. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2):57–75. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020051>

**Funding.** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education within the framework of the Priority-2030 Program and grant FEF-2024-0004 of Sakhalin State University–SakhTEH, as well as the state assignment of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (topics No. 124022100083-1, No. 124022100081-7, No 124022100074-9).

## Введение

Эстуарии и прилегающие к ним окраинные моря – неразрывные звенья биогеохимического и транспортного конвейеров системы река–море, обеспечивающих трансформацию наземного минерального и органического вещества при пересечении градиентных зон области смешения пресных–соленых вод. Дальнейшая судьба наземного материала определяется схемой течений, переносящих оставшийся в транзите материал не только в прилегающие к эстуариям окраинные моря, но и в глубоководные районы Мирового океана. Понятно, что биогеохимический и транспортный конвейеры играют важную роль в региональном и глобальном углеродном цикле. В северо-западной части Тихого океана значимым источником терригенного материала является трансграничная р. Амур, занимающая девятое место в топ-10 крупнейших в мире по длине с притоками (~5092 км). Река дренирует различные природные ландшафты умеренного климата восточной окраины Азии, от тайги до степей и полупустынь на территориях России (~54% суммарной площади водосбора), Китая (~44%) и Монголии (~2%). На территории России Амур крупнейший по среднегодовому твердому стоку (~24,5 млн т), но по водному

стоку (~365 км<sup>3</sup>) и площади бассейна (~ 1 856 000 км<sup>2</sup>) уступает сибирским водным гигантам Оби, Енисею и Лене ([1]; см. также: <https://inplanet.net/samye-bolshie-reki-v-mire>).

Морфология эстуария Амура уникальна, поскольку он заключен между геологическими структурами азиатского материка и о-ва Сахалин. Благодаря этому речные воды в разных объемах распространяются в прилегающие окраинные моря к северу и югу от устья. Биогеохимический сигнал наземного растворенного (DOM) и взвешенного органического материала (POM) регистрируется в северной части Японского моря, над подводным склоном восточного побережья о-ва Сахалин и северо-западного шельфа Охотского моря [2]. Обнаружение в промежуточных водах северной части Тихого океана следов гуминовых веществ DOM из водосбора Амура свидетельствует о масштабах функционирования глобального транспортного механизма [3].

Опосредованно через изменения циркуляции восточно-азиатского муссона происходящие глобальные климатические изменения сопровождаются увеличением интенсивности и продолжительности экстремальных гидрометеорологических явлений в бассейне Амура. Уже сейчас здесь зафиксирован рост количества и повторяемости катастрофических паводков [4, 5]. Увеличение летней водности, вероятно, не приведет к особым нарушениям в квазистационарном функционировании системы река–море. Однако вероятная аномалия увеличения зимних осадков в водосборе до 40% может повлечь за собой ряд последствий [6, 7]. Плавление огромных запасов снега вызовет весеннее суперполоводье, что резко увеличит объем мобилизации наземного материала. Росту концентрации POM и DOM способствуют прошлогодняя растительная биомасса, затронутая микробиологическими процессами, а также новая продукция весенней вегетации растений. Поэтому дренирующие поверхностные горизонты почв талые воды обогащены значительными концентрациями минеральных и органических компонентов и практически полностью транспортируются в русло реки над еще промерзшим сезонно-талым почвенным слоем [8, 9]. Отмечена более высокая лабильность DOM в весеннее половодье в арктических реках по сравнению с летним периодом [10].

Комплекс элементно-изотопных характеристик взвешенного органического углерода (POC) и общего азота (TN), d<sup>13</sup>C и d<sup>15</sup>N и др. может помочь в изучении состава терригенного материала и углеродных пулов его OM в градиентных зонах систем река–море. Биомаркеры OM – аккумуляторы уникальных гетерогенных сигналов, отражающих эффекты природного и антропогенного фракционирования. Очевидно, что они могут служить источником объективной информации о современных биогеохимическом и гидрологическом циклах аллохтонной и автохтонной компонент POM, как это показано для крупнейших сибирских и североамериканских рек Лена, Хатанга, Яна, Индигирка, Колыма, Юкон, Маккензи ([11–13]; см. также: [www.arcticgreativers.org](http://www.arcticgreativers.org)).

Цель работы – выявление особенностей межгодовой изменчивости интегрированного (природного + антропогенного) сигнала SPM и POC водосбора Амура на трансекте нижнее течение – эстуарий на основе изучения распределения SPM и элементно-изотопных маркеров POC, TN, стабильных изотопов углерода δ<sup>13</sup>C и азота δ<sup>15</sup>N. Образцы SPM и POC отобраны в фазу весеннего половодья 2005 и 2006 гг., контрастирующего по водности и, следовательно, по условиям мобилизации и транспорта терригенного материала. 2005 г. характеризовался редко наблюдаемым в половодье годовым максимумом стока и высокой водностью. Период исследований 2006 г. наложился на спад половодья до минимального межлетнего уровня реки, а кульминация половодья наступила на полтора месяца раньше прошлогодней. Мы надеемся, что полученные результаты позволят улучшить понимание транспорта и трансформации терригенного стока в процессе водной миграции через эстуарий Амура в приемные морские бассейны. Возможно, что представленные результаты облегчат интерпретацию палеоокеанографических записей изменения экологических условий в прилегающих Охотском и Японском морях в позднечетвертичное время.

## Район исследований

Территория водосборного бассейна расположена на палеозойско-мезозойской Амурской мезоплатформе со сложной пространственной конфигурацией. Большая часть водосбора занята горными хребтами, слабо расчлененными средне- и низкоргорными плато

(58%), между которыми располагаются обширные денудационные межгорные равнины. Доминирующие геологические комплексы представлены гранитными, гранитно-метаморфическими породами и их осадочными дериватами. В горном верхнем течении преобладают процессы глубинной эрозии. Баланс тонкозернистого материала дальней миграции близок к нулю, а русловой аллювий представлен галечно-гравийным и валунным материалом. В горно-равнинном среднем течении основные источники терригенного материала – песчано-глинистые и песчано-гравийные толщи, продукты склоновой денудации. Впадение крупнейших левобережных (Зея, Буряя) и правобережных (Сунгари) притоков увеличивает водность Амура более чем на половину, из-за чего скорость течения в главном русле остается сопоставимой с верховьем реки. В преимущественно равнинном нижнем течении русло расширяется до 11 км, а слияние с правым притоком Уссури увеличивает водность Амура почти на треть. Главные агенты мобилизации неоген-четвертичных песчаных и алевроитово-глинистых толщ – русловая эрозия и плоскостной смыв. Характерны пойменная многорукавность, меандрование, песчаный аккумулятивный русловой и пойменный рельеф. Нижнее течение замыкается приливной дельтой выполнения с невысокими темпами развития.

Климат водосбора преимущественно умеренно континентальный. Степные и лесостепные ландшафты аридной зоны (юго-западное правобережье Амура) водосбора отражают ослабленное влияние восточно-азиатского муссона и циклоногенеза. На горном левобережье муссонная циркуляция и вечная мерзлота обеспечивают достаточное увлажнение. На многолетнемерзлых почвах здесь доминируют кедрово-широколиственные и пихтово-еловые фитоценозы. Равнинные ландшафты вдоль главного русла представлены лиственничными и дубово-лиственничными лесами подтаежного типа с дерново-подзолистыми почвами. Широко развиты переувлажненные луга и низинные болота на торфяно-глеевых почвах, обогащенных гуминовыми веществами.

В суммарном балансе притока воды в главное русло российский сегмент водосбора дает 71% [14]. Почти 2/3 годового стока формируется за счет летнего дождевого питания, остальное поставляют снеготаяние и подземные воды. Объем водного стока может колебаться от 131 км<sup>3</sup> (2009 г.) до 445 км<sup>3</sup> (2013 г.) при среднемноголетнем 365 км<sup>3</sup>. Среднемноголетний взвешенный сток 24,9 млн т при колебаниях от 9 млн т (1976 г.) до 32 млн т (1972 г.) [1, 15]. Среднегодовой сток органического углерода ~5,3 млн т, где доля РОС всего 15% (0,81 млн т), а 85% приходится на DOM. Примерно 43% DOM представлены биогеохимически высокоподвижными фракциями гуминовых и фульвокислот, тяготеющих к горно-таежным и заболоченным участкам водосбора [16].

## **Районирование нижнего течения–эстуария и методы исследований**

Трансекта включала 560 км нижнего течения Амура до устья и ортогональный ему 324 км сегменты в прилегающих Охотском и Японском морях. Ориентация сегментов предопределена спецификой приемного бассейна стока, представляющего собой сообщающиеся через меридионально протяженный Амурский лиман U-образный Сахалинский залив Охотского моря и Λ-образную вершину Татарского пролива Японского моря (рис. 1).

Трансекта районирована на несколько ключевых сегментов: низовье Амура (ALS), речная часть эстуария (ARE, сегмент заключен между устьевым створом и границей максимальной дальности распространения вверх по реке сизигийных приливов в летнюю межень), охотоморский (OSE) и япономорский (JSE). Последние два сегмента сообщаются через Амурский лиман (ARL) (табл. 1). Комплекс наблюдений на станциях в системе нижнее течение – эстуарий реки Амур выполнялся с борта большого гидрографического катера 14–20 июня 2005 г. и 6–18 июня 2006 г. (рис. 1). Вертикальная гидрофизическая структура водной толщи регистрировалась зондом CTD RBRXR-620 доплеровским измерителем ADP SonTec. Образцы воды отбирались батометром Niskin с поверхностного и придонного (0,5 м от дна) горизонтов.

SPM выделялся фильтрационной системой Thermo Scientific. Определение валового содержания выполнялось после фильтрации через ацетилцеллюлозные мембраны Watman (диаметр пор 0,45 мкм) взвешиванием с точностью ±0,0001 г. Стеклообразные микрофильтры Watman GF/F (диаметр пор 0,70 мкм) со взвесью использовались для изучения органического

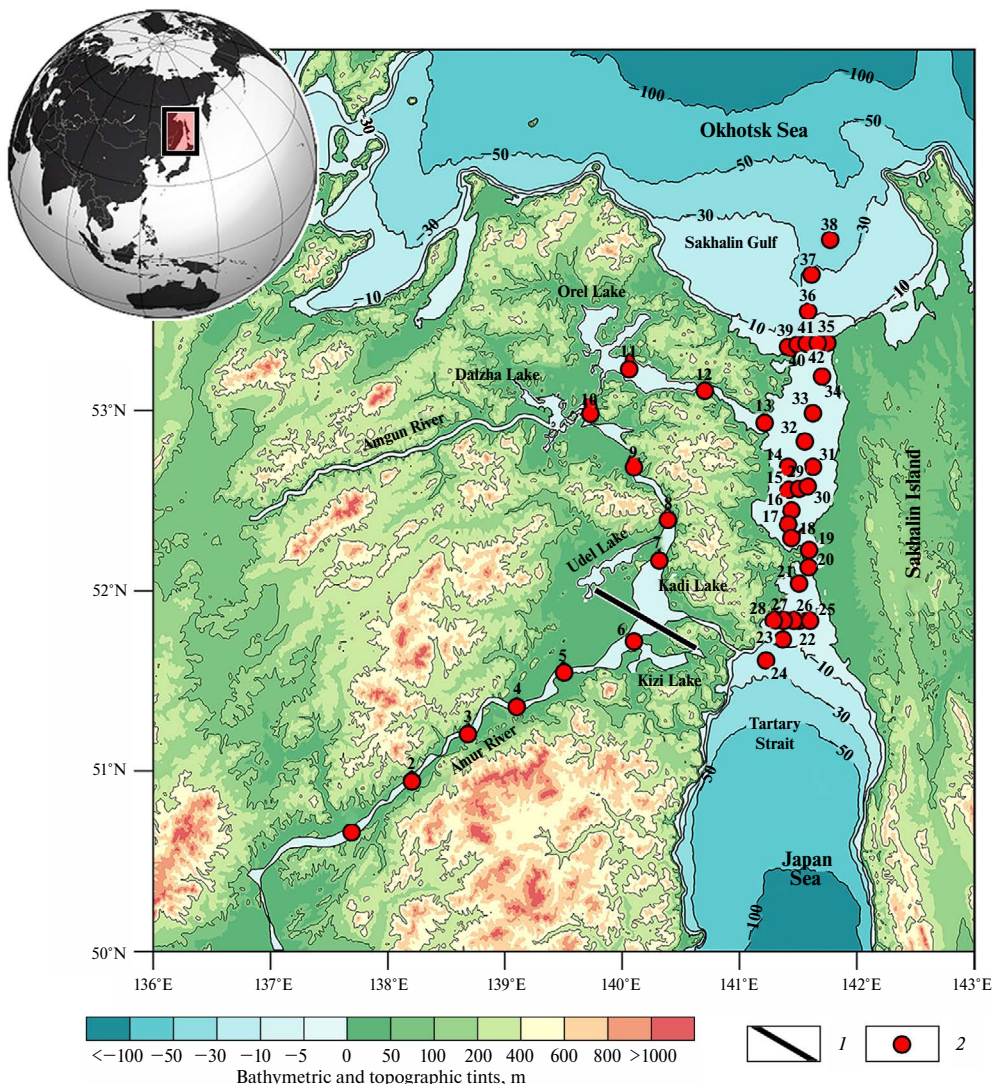


Рис. 1. Район исследований: 1 – верхняя граница речной части эстуария, 2 – станции 2005 и 2006 гг.

углерода (POC), общего азота (TN), стабильных изотопов углерода ( $^{13}\text{C}$ ) и азота ( $^{15}\text{N}$ ). Аналитические исследования проведены в лаборатории Международного арктического центра университета Аляска, Фэрбанк (IARCUAF, США). Использовался анализатор Carlo Erba NC 2500, соединенный через сплит-интерфейс с масс-спектрометром Finnigan MAT Delta Plus. Каждый образец подвергался трем параллельным измерениям; точность и воспроизводимость определений POC  $<0,1\%$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  – соответственно  $\pm 0,1$  и  $\pm 0,2\%$ . Полученные изотопные значения приведены в соответствие с международным стандартом VPDB [17, 18].

## Результаты и дискуссия

### Гидрометеорологическая обстановка периода наблюдений

Гидрологические условия пробоотбора 2005 и 2006 гг. существенно различались. Первая декада июня 2005 г. выделилась редко наблюдаемым в весеннее половодье годовым максимумом стока  $22\,600\text{ м}^3\text{с}^{-1}$ . Расходы оказались выше среднегодовых для этого ме-

Гидролого-морфологические сегменты района исследований

Гидролого-морфологические сегменты	Протяженность, км	Глубина, м	Кол-во станций*
Нижний Амур (ALS)	224	4,5–16,1	5
Нижний Амур, речная часть эстуария (ARE)	326	3,9–11	8
Амурский лиман, морская часть эстуария (ARL)	185	3,5–15,5	10
Сахалинский залив, охотоморская часть эстуария (OSE)	76	4–11	5
Татарский пролив, япономорская часть эстуария (JSE)	63	3,7–11	6

\* Для 2005 и 2006 гг.

сяца более чем на  $5000 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$  (данные гидрологического поста «Комсомольск-на-Амуре»). Летне-осенний максимум не проявился из-за недостаточного количества атмосферных осадков (рис. 2, 3, 1). Учитывая время добегания речных вод от начала трансекты в эстуарий  $\sim 7\text{--}8$  сут [19], исследования 2005 г. выполнялись в кульминацию весеннего половодья на фоне подъема уровня реки до 350 см. Весеннее половодье 2006 г. (рис. 2, 3, 2) оказалось маловодным. Его кульминация наступила на полмесяца раньше предыдущего года в середине мая, когда расходы воды поднялись до  $13\,700 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . В июне сток ослабел – среднемесячный расход составил  $11\,600 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$  (вдвое ниже 2005 г.), а минимальный достигал  $9340 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . Как видно, период работ совпал не только с низкими расходами, но и вообще со спадом половодья. К окончанию исследований уровень реки снизился до минимального для межени значения 35 см.

Преобладание в водном балансе снеговых и подземных вод отразилось в изменении температуры воды не только в нижнем течении Амура, но и в Амурском лимане. по сравнению с 2005 г. среднее (интегральное по вертикали) значение в сегментах ALS и ARE снизилось от  $19,5$  до  $16,9$  °C, в ARL – от  $14,8$  до  $12,7$  °C (табл. 2; рис. 4, 5).

Возобновление свободного водообмена между сегментами ARL и OSE произошло на рубеже мая–июня. Триггером гидравлического удара, выбившего из вершины Сахалинского залива дамбу нагроможденных ледяных торосов, мог быть первый положительный экстремум весеннего половодья в Амурском лимане, который спровоцировал подпор вод на северной и южной границах лимана.

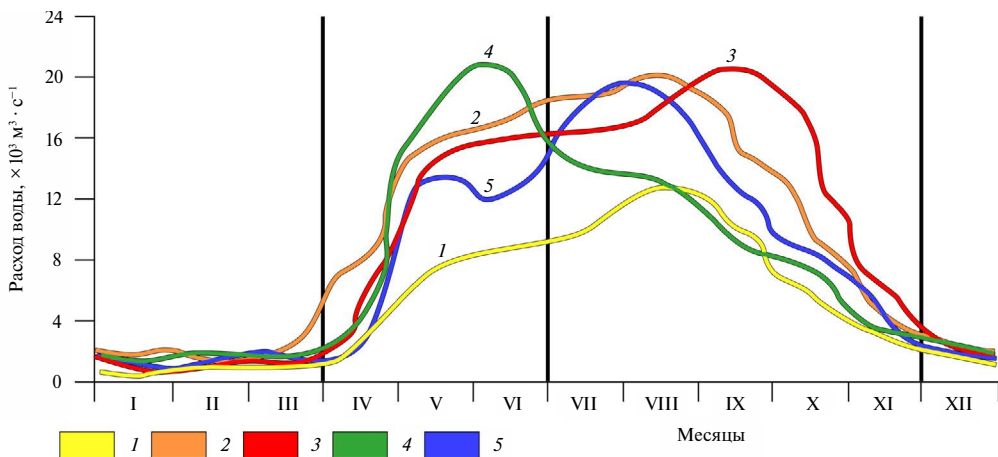


Рис. 2. Гидрографы стока р. Амур: 1 – низкий сток, 2 – высокий сток, 3 – среднегодовое, 4 – 2005 г., 5 – 2006 г. (данные гидрологического поста «Комсомольск-на-Амуре», <https://portal.grdc.bafg.de/>)



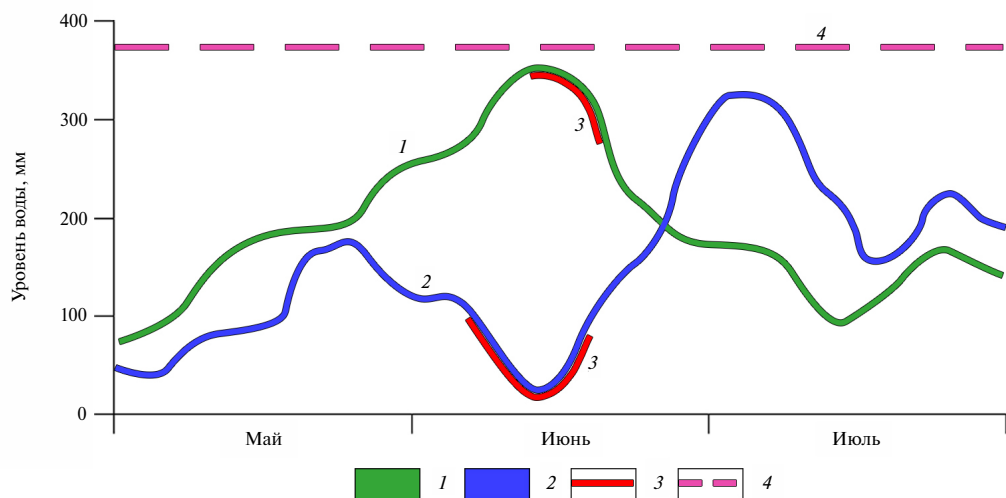


Рис. 3. Изменения уровня воды р. Амур весной–летом 2005 (1) и 2006 (2) гг. Сегменты (3) указывают на периоды работ (данные гидрологического поста «Комсомольск-на-Амуре», <https://portal.grdc.bafg.de/>). 4 – уровень воды в Амуре, соответствующий началу затопления поймы (380 см)

Таблица 2

**Изменчивость характеристик поверхностных вод на трансекте река–море**

Характеристика		ALS + ARE	ARL	OSE <sup>4</sup>	JSE <sup>4</sup>
S, ‰ <sup>2</sup>	2005	0,03÷0,04/0,03	0,03÷13,1/3,7	0,2÷29,2 <sup>4</sup> /8,7	18,8÷27,0 <sup>4</sup> /23,4
	2006	0,03÷0,05/0,04	0,04÷15,9/5,8	0,9÷27,6 <sup>4</sup> /8,2	11,6÷26,6 <sup>4</sup> /21,0
T°C <sup>3</sup>	2005	18,0÷20,2/19,5	9,3÷18,5/14,8	13,9÷15,1/14,6	9,4÷11,1/10,1
	2006	15,7÷18,3/16,9	9,7÷14,8/12,7	10,8÷16,8/12,7	9,7÷14,1/10,9
SPM, мг л <sup>-1</sup>	2005	14,2÷30,1/20,4	10,2÷33,6/ 18,4	5,2÷7,5/6,1	3,3÷11,6/5,9
	2006	15,3÷24,8/19,9	15,3÷61,2/ 32,4	9,1÷71,0/27,4	8,7÷31,1/17,1
POC, %	2005	0,8÷1,4/1,3	1,1÷1,2/1,2	1,2÷3,1/2,4	0,9÷10,6/5,8
	2006	0,7÷2,1/1,1	0,4÷1,7/1,0	0,6÷8,2/5,0	2,2÷2,3/2,3
TN, %	2005	0,10÷0,17/0,13	0,13÷0,15/0,14	0,16÷0,38/0,27	0,10÷1,29/0,62
	2006	0,09÷0,30/0,15	0,02÷0,19/0,10	0,06÷0,90/0,51	0,23÷0,28/0,25
POC/TN	2005	7,8÷9,8/8,2	8,0÷8,1/8,1	7,8÷8,4/8,1	8,2÷9,1/8,7
	2006	6,8÷9,9/7,5	9,1÷10,3/9,7	5,6÷9,2/7,2	9,1÷9,9/9,5
δ <sup>13</sup> C, ‰	2005	-29,5÷ -27,9/-28,9	-28,8÷-28,7 /-28,8	-27,4÷-25,7/-26,6	-26,6÷-24,9/-25,7
	2006	-29,9÷-28,7/-29,4	-27,5÷-26,4/ -27,2	-26,2÷-23,6/-24,6	-28,7÷-24,2/-25,9
δ <sup>15</sup> N, ‰	2005	5,0÷7,2/6,1	7,2÷8,2/7,7	5,6÷6,5/6,0	4,9÷8,1/6,5
	2006	3,3÷4,1/3,7	5,2÷8,4/6,1	6,7÷7,9/7,2	5,9÷6,6/6,4

Примечание. <sup>1</sup>мин-макс/среднее, <sup>2</sup>соленость, <sup>3</sup>температура, <sup>4</sup>с учетом значений на широтных раз-  
резах через северную и южную границы сегмента ARL.

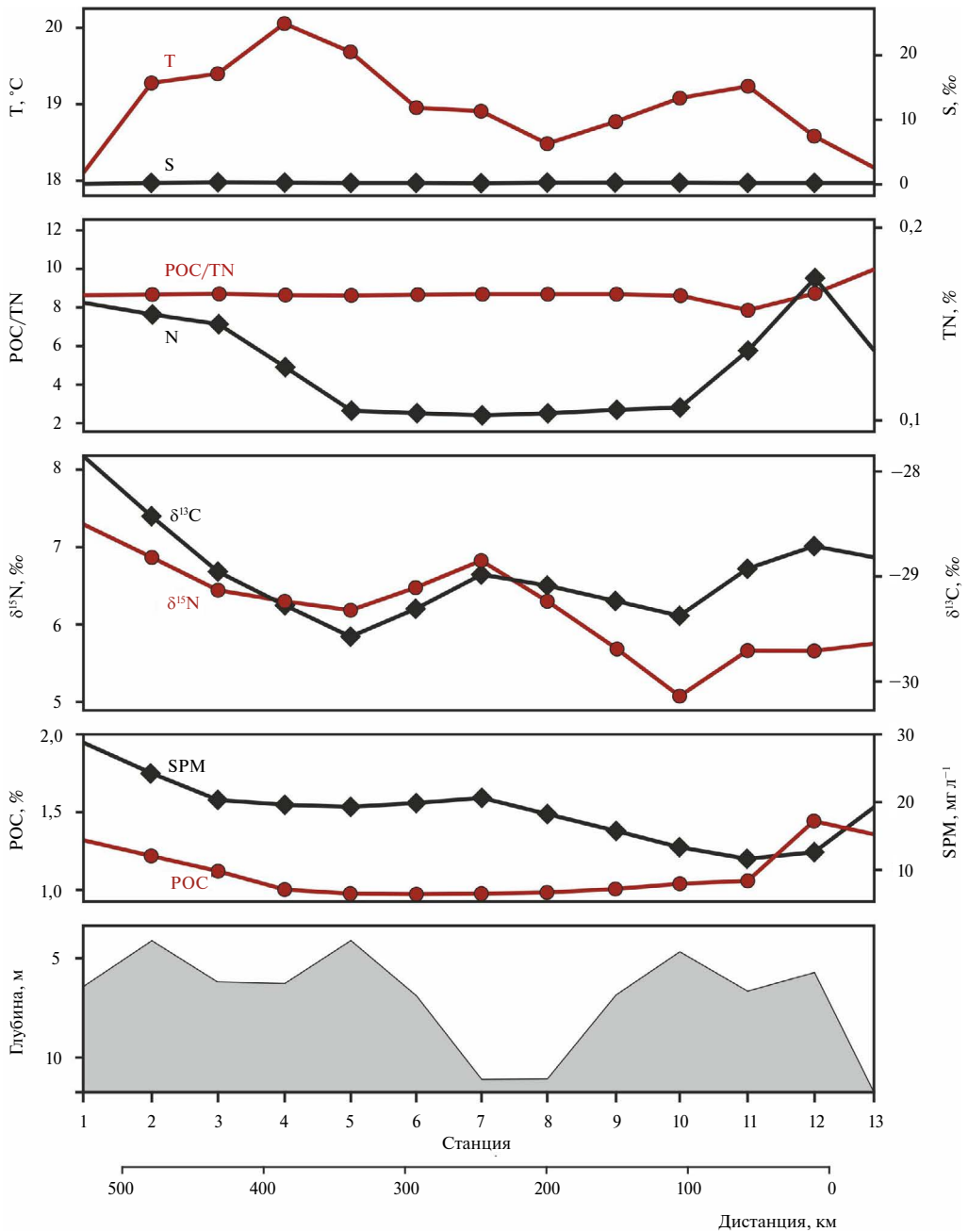


Рис. 4. Изменчивость гидрологических параметров и биогеохимических характеристик SPM-POM на трансекте нижнее течение реки – устье Амура (сегменты ALS, ARE). Июнь 2005 г.

### Масштабы межгодовой изменчивости литодинамического сигнала SPM

В 2005 и 2006 гг. на 560 км участке нижнего течения до устья соленость не превышала 0,04 ‰ (табл. 1). Сегмент ARE выделялся только по дальности проникновения вверх по реке колебаний уровня морского происхождения.

Содержание SPM к устью в 2005 г. сократилось более чем в 2 раза (от 30,1 до 14,5 мг л<sup>-1</sup>, среднее 20,4 мг л<sup>-1</sup>), что отражало усиление седиментации частиц под влиянием приливного

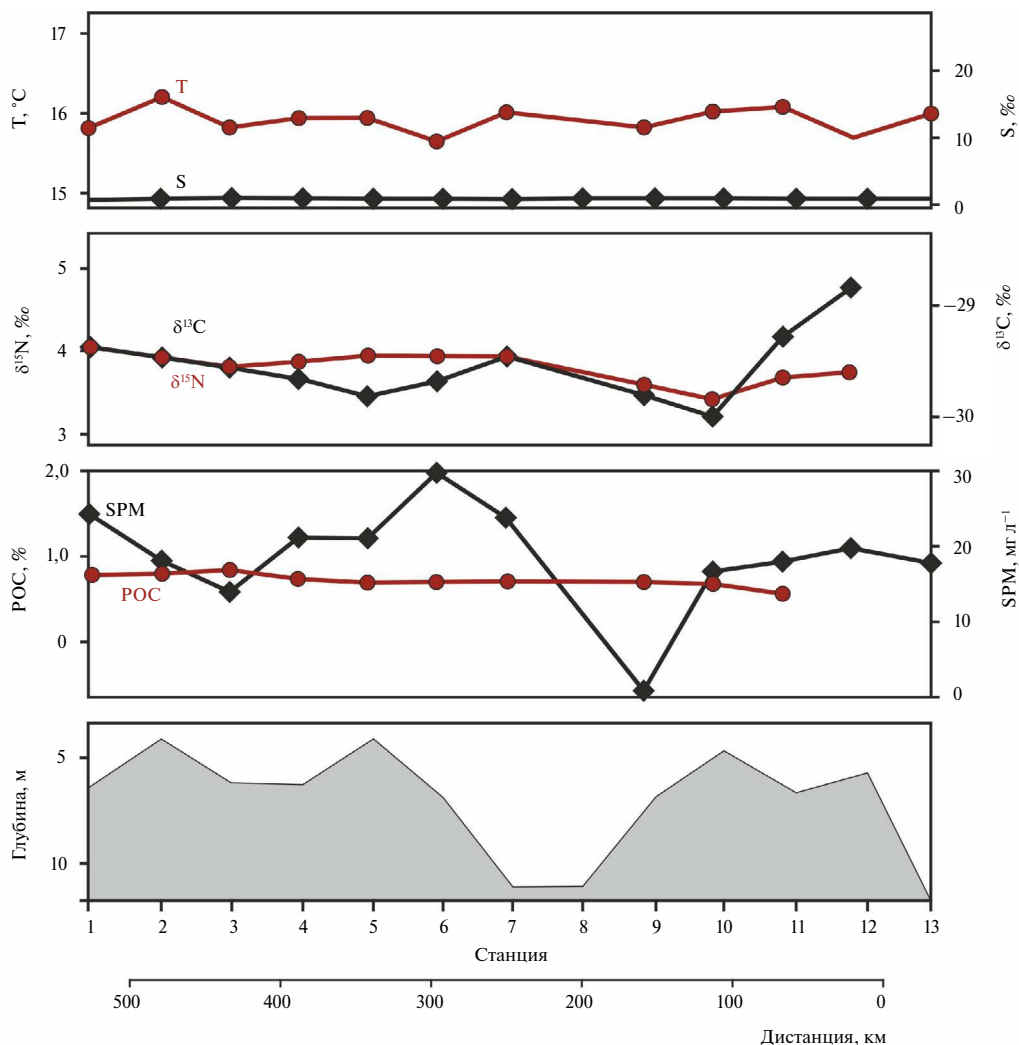


Рис. 5. Изменчивость гидрологических параметров и биогеохимических характеристик SPM-POC на трансекте нижнее течение реки – устье Амура (сегменты ALS, ARE). Июнь 2006 г.

подпора. Несмотря на значительно меньшую водность реки, в 2006 г. содержание изменилось незначительно (15,3–24,8 мг л<sup>-1</sup>, среднее 19,9 мг л<sup>-1</sup>). Стабильным был и тренд снижения значений к устью в 1,6–2 раза. В то же время распределение значений на трансекте отличалось прежде всего вследствие ослабления транспортирующей способности речного потока в 2006 г. На первый взгляд, неупорядоченные колебания содержания SPM отражали локальные участки турбулизации потока над неоднородностями донного рельефа. В 2005 г. такие участки сглаживались повышенной водностью Амура. Пересечение глубоководных участков русла сопровождалось снижением содержания SPM, что и было зарегистрировано в вершине сегмента ARE. Большие глубины (до 23–26 м) и значительная ширина русла (до 5–10 км) приводили к распластыванию и ослаблению взвешенного потока, а колебания уровня морского происхождения здесь угасали. Эрозия мелководий приводила к обратному эффекту.

Несмотря на различные режимы прохождения весеннего половодья, сопоставимый литодинамический сигнал по содержанию SPM сохранился в 2005 и 2006 гг., что с определенными допущениями позволяет считать его фоновым, кроме периодов с аномалиями стока в этот сезон.

В 2005 и 2006 гг. пресные воды ( $S < 0,05\text{‰}$ ) занимали значительную часть Амурского лимана, веерообразно растекаясь по его поверхности в диаметрально противоположных

направлениях до островного берега. В северной части лимана на границе взаимодействия речного шлейфа с интрузией охотоморских вод сформировался соленостный фронт. Такой же гидрологический раздел прослеживался в южной части лимана, куда проникали япономорские воды (рис. 6, 7). Внутрисуточная изменчивость гидрологических характеристик выделялась небольшими амплитудами, отсутствием выраженных периодических составляющих.

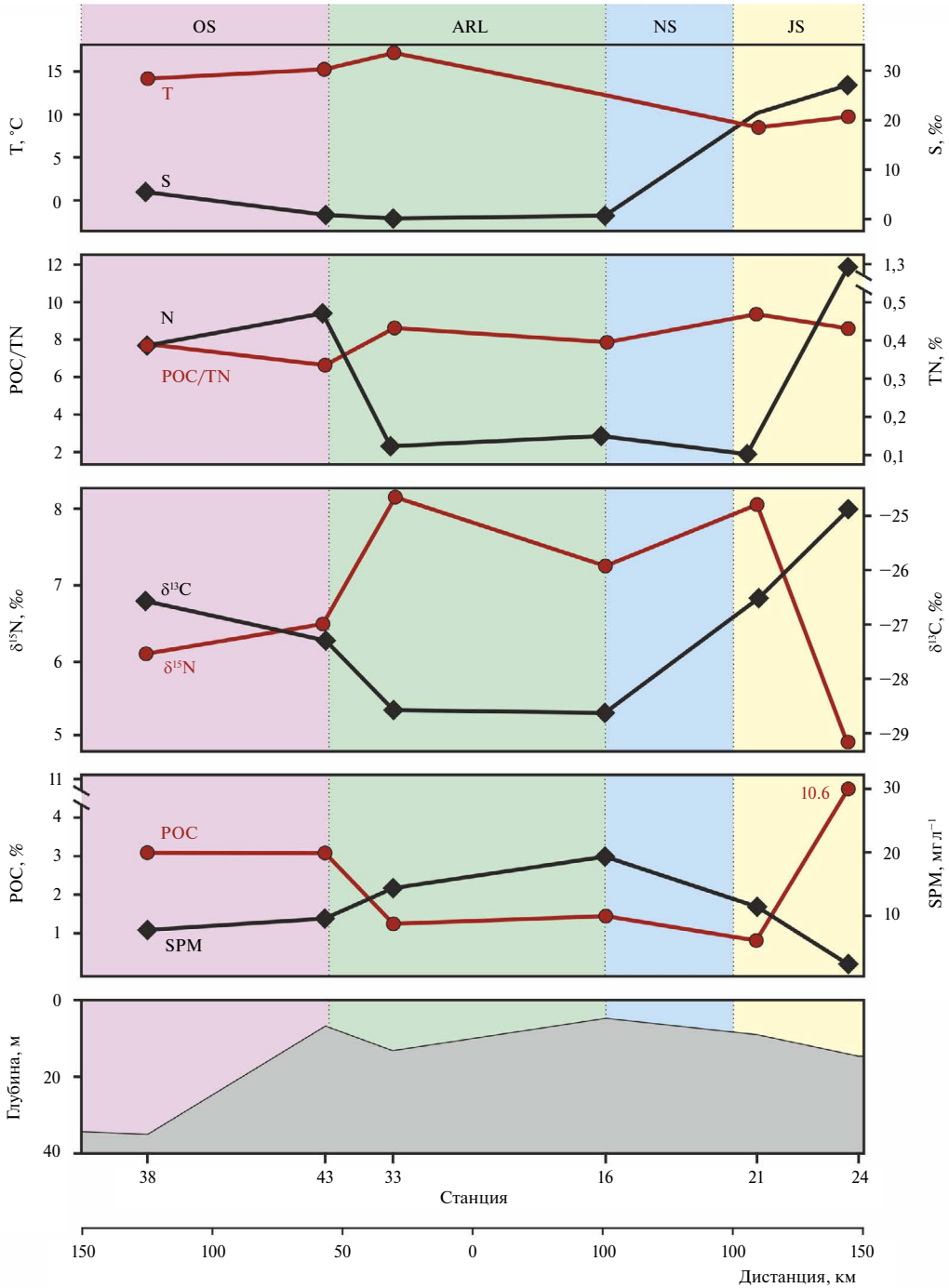


Рис. 6. Изменчивость гидрологических параметров и биогеохимических характеристик SPM-POM через сегменты ARL, OSE, JSE. Июнь 2005 г.

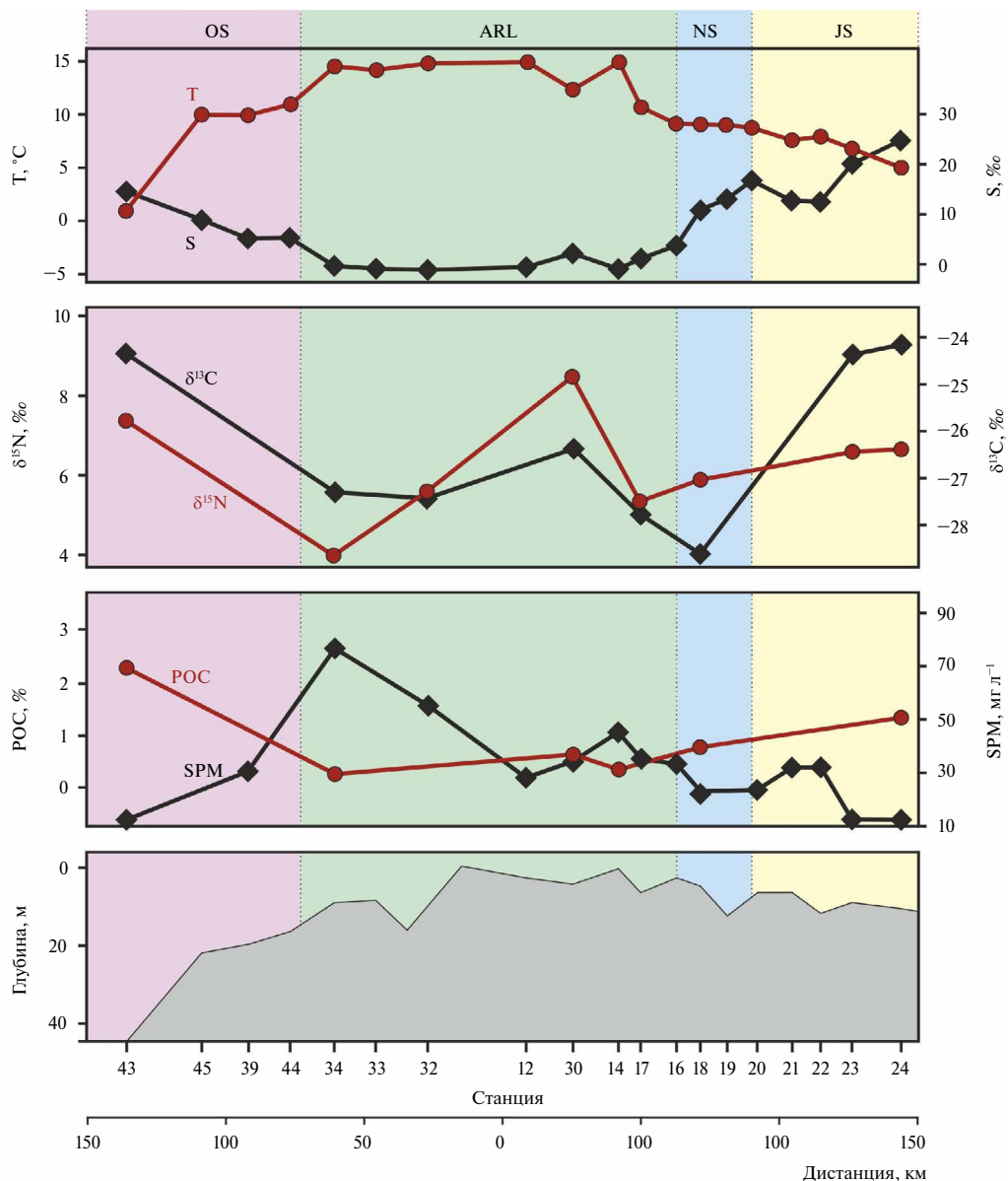


Рис. 7. Изменчивость гидрологических параметров и биогеохимических характеристик SPM-POM через сегменты ARL, OSE, JSE. Июнь 2006 г.

Направление течения ограничивалось сектором 260–350°, без типичного для приливных колебаний вращения [20].

Содержание SPM в июне 2005 г. колебалось между 10,2–33,6 мг л<sup>-1</sup> (среднее значение 18,4 мг л<sup>-1</sup>), а это сопоставимо с водами сегмента ARE. Область максимальных значений была сконцентрирована вдоль устьевое створа. В водах осевой части лимана содержание уменьшалось до 10–20 мг л<sup>-1</sup> с усилением данного тренда к сегментам OSE и JSE В июне 2006 г. содержание SPM возросло до 15,3–61,2 мг л<sup>-1</sup> (среднее значение 32,4 мг л<sup>-1</sup>) (рис. 6, 7). Резкое увеличение значений до максимальных на границе ARL-OSE обусловлено торможением стокового шлейфа охотоморским приливом. К югу от устья содержание SPM сокращалось до 17 мг л<sup>-1</sup> у границы с JSE. Содержание SPM в 2005 и 2006 гг. в лимане не относилось даже к повышенному, поскольку было ниже периода осеннего дождевого

паводка в несколько десятков раз. Движение стокового шлейфа в OSE отклонялось вправо к о-ву Сахалин, в соответствии с действием силы Кориолиса в Северном полушарии. На внешней границе шлейфа сформировалась полужамкнутая антициклоническая циркуляция [20]. Наблюдалось устойчивое снижение значений SPM на трансекте из лимана в OSE и JSE. Уровень содержания в июне 2005 г. в OSE составил 5,2–7,5 мг л<sup>-1</sup> (среднее 6,1 мг л<sup>-1</sup>). Это означало трехкратные потери SPM в результате седиментации на фоне роста солености. Аналогичное распределение отмечено и для сегмента JSE (3,3–11,6 мг л<sup>-1</sup>, среднее 5,9 мг л<sup>-1</sup>).

В июне 2006 г. содержание SPM оказалось выше в сравнении с 2005 г. Максимум обнаружен на замыкающем северном створе лимана, откуда значения в шлейфе стоковых вод снижались (рис. 7). Горизонтальный градиент изменения содержания SPM на этом участке составлял 0,9 мг л<sup>-1</sup> км<sup>-1</sup> (в июне 2005 г. – 0,06 мг л<sup>-1</sup> км<sup>-1</sup>). Измерения выполнялись в прилив, так как синхронно с ростом солености происходило снижение значений SPM. Оно обусловлено торможением стокового шлейфа на границе раздела с солевым клином (коэффициент корреляции  $r$  для 2005 и 2006 гг. соответственно –0,6 и –0,8).

Таким образом, в 2006 г. выявлен двукратный рост содержания SPM в сегменте ARL и трехкратный – в сегментах OSE и JSE относительно предыдущего года. Содержание в сегментах нижнего течения Амура ALS, ARE и в Амурском лимане в 2005 г. было сопоставимо. На следующий год значения SPM в ARL увеличилось в 1,6 раза по сравнению с нижним течением реки по причине гидродинамической ресуспензии. На это указывают придонные максимумы значений SPM до 94 мг л<sup>-1</sup> (табл. 1; рис. 4–7) в градиентной осевой части лимана. Повышение содержания в сегментах OSE и JSE обеспечивали стоковые течения, транспортирующие ремобилизованный SPM за пределы ARL.

### **Масштабы межгодовой изменчивости биогеохимического сигнала POM**

В нижнем течении Амура вариации значений элементно-изотопных характеристик POM в июне 2005 и 2006 гг. выражены следующими диапазонами: POC (0,7–2,1%, среднее = 1,2%), TN (0,09–0,30%, среднее = 0,14%), POC/TN (6,8–9,9, среднее = 7,8),  $\delta^{13}\text{C}$  (от –29,9 до –27,9‰, среднее = –29,1‰) и  $\delta^{15}\text{N}$  (3,3–7,2‰, среднее = 4,9‰) (табл. 1; рис. 4, 5). Для ARL, в условиях начальной стадии смешения вод, диапазоны изменяются. Значения POC колебались от 0,4 до 1,7% (среднее 1,1%), TN – от 0,02 до 0,15% (среднее 0,12%), POC/TN – от 8,0 до 10,3 (среднее 8,9),  $\delta^{13}\text{C}$  – от –28,8 до –26,4‰ (среднее –28,0‰) и  $\delta^{15}\text{N}$  – от 5,2 до 8,4‰ (среднее 4,9‰). по сравнению с сегментами ALS, ARE, ARL в OSE и JSE содержание POC увеличилось в несколько раз. Более низкие значения в июне 2005 г. в OSE свидетельствуют о лимитировании продуктивности вод повышенным содержанием SPM по сравнению с JSE. Возможно, такое ограничение обусловлено происшедшим две недели назад залповым выбросом из лимана огромного объема относительно теплой и мутной пресной воды. Он вызвал разрушение зимней стратификации вод в восточной части Сахалинского залива, которая по мере заполнения стокового шлейфа на момент исследований приобрела черты двухслойной циркуляции, типичной для эстуариев. В 2006 г. ослабленный стоковый шлейф способствовал задержке выноса припайного льда из залива. Близость фронта холода проявилась в более низкой температуре воды. Лед вытеснялся к периферии стокового шлейфа, таял и обогащал прилегающие воды биогенными компонентами. Все это способствовало условиям для развития планктона.

Схожий тренд отмечен и в изменении содержания TN. Диапазон величин POC/TN в OSE колебался от 5,6 до 9,2 (среднее 7,6), тогда как в JSE был ограничен диапазоном 8,2–9,9 (среднее 9,1). Межгодовые изменения, обусловленные колебаниями водности реки, просматриваются и в значениях  $\delta^{13}\text{C}$ . Средний изотопный состав POC в водах JSE в 2005 и 2006 гг. сохранялся на уровне –25,8‰. В Сахалинском заливе и Татарском проливе диапазон значений  $\delta^{13}\text{C}$  был менее широк в 2005 г. в противоположность 2006 г. Это видно по крайним значениям: от –26,2 до –23,6‰ и от –28,7 до –24,2‰ соответственно для OSE и JSE (табл. 1; рис. 6, 7).

## Оценка возможных источников РОМ

В июне 2005 г. соленость и температура поверхностных вод на всем протяжении трансекты в сегментах ALS–ARE оставались стабильными (соответственно,  $\sim 0,03\%$  и  $18\text{--}20,2\text{ }^\circ\text{C}$ ). Значения SPM, РОС и TN вниз по течению плавно снижались и незначительно увеличивались в устье (ст. 12, 13) (рис. 4). Величины  $\delta^{13}\text{C}$  – terrРОС на трансекте до устья представлены диапазоном  $-29,5 \div -27,9\%$ , сравнимом с  $\delta^{13}\text{C}$  типичной наземной СЗ растительности [21]. Содержание  $\delta^{15}\text{N}$  от 5,0 до 7,2‰ в целом отвечало терригенному органическому материалу взвеси (SPM-terrРОМ) [22]. Поведение  $\delta^{15}\text{N}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  на трансекте до устья хорошо согласовывалось между собой ( $r = 0,66$ ). Данное обстоятельство позволило предположить схожесть процессов, влияющих на изотопные эффекты. Так, они могут обуславливаться ассимиляцией фитопланктоном  $\text{NO}_3$ , фиксацией  $\text{N}_2$  и денитрификацией водной экосистемы. Отношение РОС/TN указывало на генетическую связь с источником SPM-terrРОМ и степень его раннедиагенетической минерализации. Значения отношения от 7,8 до 9,8 отражали невысокое содержание РОС и TN ( $r = 0,76$ ), с трендом слабого роста к устью. Обычно SPM-terrРОМ характеризуется значениями отношения от 12–15 [23]. При разнообразии и неопределенности степени преобразованности terrРОМ в результате окислительно-восстановительного диагенеза выявленный диапазон величин объясняется смещением РОМ терригенной наземной и водной экосистем.

В направлении максимального стока амурских вод (на север лимана) происходило слабое облегчение изотопного состава  $^{13}\text{C}$  и  $^{15}\text{N}$ , а также незначительное снижение содержания РОС и TN. Противоположное поведение этих характеристик отмечено в водах, транспортируемых в Татарский пролив. Выявлена корреляция указанных характеристик с температурой поверхностной воды (наблюдалось снижение температуры почти на  $5\text{ }^\circ\text{C}$  из-за подпора япономорским приливом в узле эрозийных желобов на юге лимана. Здесь происходило концентрирование SPM-РОМ, вызывающее слабый рост РОС и TN. Результирующий элементный и изотопный терригенный сигнал SPM-РОМ в сегментах ARL, ALS и ARE, формирующийся в результате смешения разнообразных наземных источников и речного планктона, схож. К границе OSE с лиманом произошли трехкратное увеличение содержания РОС (от 1 до 3 %) и TN (от 0,15 до 0,48%), как рефлекс на слабый рост солености и уменьшение содержания SPM. Изменения TN, вероятно, связаны с увеличением содержания органического и неорганического N, что, скорее всего, и отразилось в снижении величины РОС/TN от 8,7 до 7. Отмечены слабое утяжеление стабильного изотопа  $^{13}\text{C}$  (от  $-28,5$  до  $-27,3\%$ ) и облегчение изотопа  $^{15}\text{N}$  (от 8,2 до 6,5‰). В вершине Сахалинского залива поведение характеристик SPM-РОМ стабилизировалось. К северной точке трансекты S возросла на 5‰ (до 7‰), температура снизилась на  $3\text{ }^\circ\text{C}$  (до  $14\text{ }^\circ\text{C}$ ). Содержание РОС сохранилось на уровне  $\sim 3\%$ , TN снизилось на 0,13 %, величина РОС/TN несущественно возросла (от 7 до 8). Утяжеление изотопа  $^{13}\text{C}$  достигло  $-26,7\%$ , величина стабильного изотопа  $^{15}\text{N}$  возросла до 6‰ (рис. 6; табл. 1).

На внешнем устьевом баре в вершине Сахалинского залива в результате гравитационных и биогеохимических процессов содержание снижалось в 3 раза по сравнению с водами ARL. За счет потери гидравлически крупной SPM в транзите оставались преимущественно ее алевритово-пелитовые фракции. Минеральная матрица глинистых частиц участвует в сорбции РОМ речных гуминовых веществ, результат которой проявляется в увеличении содержания РОС. Его среднее содержание, как и TN сегмента OSE, увеличилось в 2 раза, как по указанной причине, так и вследствие роста пула морского источника РОМ. В то же время средняя величина РОС/TN равная 8,1 в OSE не изменилась относительно SPM сегментов ALS, ARE и ARL, однако облегчился состав  $\delta^{15}\text{N}$  и утяжелился  $\delta^{13}\text{C}$ , а это признаки усиления влияния морского планктона и «свежести» РОМ, как отмечалось в работе [17].

При количественной оценке относительного вклада terrРОС использовалось уравнение изотопного материального баланса [23, 24]. В качестве реперных значений использовалась величина  $^{13}\text{C}$  охотоморского планктона ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{mar}}$ ), соответствующая  $-21,7\%$  [25] и  $^{13}\text{C}$  терригенного источника  $-27,6\%$  [11]. Тренд снижения значений terrРОС от 100 до 78% (среднее 89%) в сторону Охотского моря означал латеральное перераспределение доли источников РОС, в частности увеличение содержания морского РОС (marРОС).

Более сложное распределение биогеохимических характеристик SPM-ПОМ наблюдалось в направлении сегмента JSE, куда транспортировалась треть водного стока Амура. Начало роста солёности приурочено к узлу разветвления эрозионных желобов, в 30 км от пролива Невельского. В самом проливе S достигла 12–18‰ и продолжила увеличиваться к югу. по сравнению с OSE количественные характеристики фитопланктона, концентрация биогенных элементов были ниже, но интенсивный фотосинтез обеспечил JSE статус эвтрофного бассейна [26]. На фоне роста солёности поведение SPM проявило консервативный характер, снизившись от узла разветвления желобов к южной станции трансекты в несколько раз ( $r = -0,59$ ). Аналогичное поведение проявил  $^{13}\text{C}$  – он утяжелился с  $-28,7$  до  $-24,9\text{‰}$  при росте S от 12 до 27‰ ( $r = 0,88$ ). При достижении S = 22‰ содержание РОС и TN увеличилось почти на порядок, поэтому величина РОС/TN сохранилась в диапазоне 8,2–9,1. Содержание  $^{15}\text{N}$  снизилось от 8,1 до 4,9‰. Очевидно, что влияние морского планктона на состав SPM-ПОМ более значимо в сегменте JSE. Вклад terrPOC сократился в JSE почти в 2 раза (от 93 до 44%, среднее 61%), и, таким образом, вклад marPOC достигал 56%.

Ожидалось, что невысокий водный сток в июне 2006 г. должен был привести к ослаблению мобилизационного потенциала терригенного материала в водосборе Амура. Между тем содержание SPM в сегментах ALS, ARE было сопоставимо с июнем 2005 г. Это может означать, что недостающий объём терригенного материала компенсируется продуктами размыва низкой поймы и русловых аккумулятивных образований. Поэтому в нижнем течении реки наблюдались колебания содержания SPM от 3,2 до 24,8 мг л<sup>-1</sup>. К примеру, отмечено увеличение содержания над мелководными эродлируемыми участками русла и резкое снижение над глубоководными плесами. К последним также приурочено увеличение содержания изотопов  $^{13}\text{C}$  до  $-29,9\text{‰}$  и  $^{15}\text{N}$  до 4,1‰ (рис. 5). Выявленное облегчение  $\delta^{13}\text{C}$ , возможно, связано с изотопным фракционированием ПОМ, сопровождающим усиление цветения диатомовых водорослей. На интенсификацию первичного продуцирования могли повлиять концентрация  $\text{O}_2$  в нижнем течении реки, близкая к равновесной с атмосферной, рост в 3,5 раза по сравнению с июнем 2005 г. содержания хлорофилла, невысокое содержание гуминовых веществ (в несколько раз ниже), лимитирующее доминирование деструкционных процессов [27].

По понятным причинам максимум содержания SPM приурочен к границе с Сахалинским заливом. Тренды распределения изученных характеристик SPM-ПОМ в OSE и JSE в целом сохранились. Как и в 2005 г., четко обозначенные градиентные зоны формировались на севере и юге Амурского лимана. На границе между OSE и ARL, например, в начальную стадию смещения вод (S ~5‰) быстро сокращалось содержание SPM (градиент SPM = 0,73 мг л<sup>-1</sup>км<sup>-1</sup>, градиент S = 0,15‰). Увеличилось содержание РОС (градиент 0,02%) и  $^{13}\text{C}$  ( $\Delta = -2,6\text{‰}$ ) и  $^{15}\text{N}$  ( $\Delta = 1,2\text{‰}$ ). Содержание TN при пересечении градиентной зоны в OSE возросло в 5 раз (и в 2,5 раза в JSE), но величина РОС/ TN снизилась (коэффициент корреляции r между TN и РОС/ TN составил  $-0,80$ ). Аналогичное распределение характерно и для сегмента JSE.

Вариации доли terrPOC в нижнем течении Амура и лимане оценены в 95–100% (т.е. marPOC = 0–5%), в OSE – 43–87% (marPOC = 13–57%) и в JSE – от 44 до 93% (marPOC = 7–56%).

## Выводы

В весеннее половодье 2005 и 2006 гг. в нижнем течении и эстуарии реки Амур выполнены наблюдения за изменчивостью литодинамических и биогеохимических характеристик взвеси. Периоды исследований кардинально различались между собой по водности, условиям мобилизации терригенного материала в водосборе. Работы в июне 2005 г. выполнены в кульминацию достижения высокого уровня реки, а в следующем году – в кульминацию наинизшего меженного уровня Амура.

В периоды работ 2005 и 2006 гг. не выявлено значимых отличий содержания SPM в нижнем течении Амура, однако они проявились в морских сегментах эстуария. В Амурском лимане уровень содержания регулировался процессами волновой эрозии обширных мелководий – первопричины 2–3-кратного роста содержания в 2006 г. В сегментах OSE и JSE



поведение SPM контролировалось изменениями солёности. Результирующий вклад терригенного источника РОС отражали значения  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-28$  до  $-29\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  – от  $7,3$  до  $5,7\text{‰}$ , отношения РОС/TN – от  $8$  до  $10$ . В двухлетнем цикле выполненных наблюдений существенных изменений в распределении не установлено.

Межгодовые различия водности реки проявились в распространении стокового шлейфа в ARL, OSE и JSE. Транзит вод через эти сегменты сопровождался выведением из переноса гидравлически крупных частиц, ассоциирующих с тяжёлыми минералами. Глинистая компонента SPM чутко реагировала на увеличение солёности, вызывая рост значений не только terrPOC, но и вклада планктогенного marPOC. На удалённых от границ лимана станциях трансекты его вклад достигал  $57\%$ , а элементно-изотопный сигнал характеризовался утяжелением  $\delta^{13}\text{C}$  до  $-25\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  – до  $8\text{‰}$ , снижением величины РОС/TN до  $7-8$ .

В обстановке современных глобальных климатических изменений результаты работы могут быть полезным при мониторинге экспорта терригенного материала в окраинно-тихоокеанские моря.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: ГЕОС, 2011. 660 с.
2. Yasuda T., Asahara Y., Ichikawa R. et al. Distribution and transport processes of lithogenic material from the Amur River revealed by the Sr and Nd isotope ratios of sediments from the Sea of Okhotsk // *Progress in Oceanography*. 2014. Vol. 126. P. 155–167.
3. Seki O., Mikami Y., Nagao S. et al. Lignin phenols and BIT index distributions in the Amur River and the Sea of Okhotsk: Implications for the source and transport of particulate terrestrial organic matter to the ocean // *Progress in Oceanography*. 2014. Vol. 126. P. 146–154.
4. Шамов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Макагонова М.А. Исследования гидрологических последствий современных изменений климата в Дальневосточном регионе России // *Вестник ДВО РАН*. 2014. № 2. С. 15–23.
5. Tachibana Y., Oshima K., Ogi M. Seasonal and interannual variations of Amur River discharge and their relationships to large-scale atmospheric patterns and moisture fluxes // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. D16102.
6. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. Оценка изменений водного режима реки Амур в XXI веке при двух способах задания климатических проекций в модели формирования речного стока // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45, № 3. С. 223–234.
7. Калугин А.С. Модель формирования стока реки Амур и ее применение для оценки возможных изменений водного режима / автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2016. 24 с.
8. Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J. et al. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas // *Estuaries Coasts*. 2012. Vol. 35. P. 369–382.
9. Frey K.E., McClelland J.W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry // *Hydrol. Process*. 2009. Vol. 23. P. 169–182.
10. Holmes R.M., McClelland J.W., Raymond P.A. et al. Lability of DOC transported by Alaskan rivers to the Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. L03402.
11. Дударев О.В., Семилетов И.П., Чаркин А.Н. Масштабы изменчивости состава взвеси в системе река Лена – море Лаптевых // *Докл. Акад. наук*. 2006. Т. 411, № 4. С. 527–534.
12. Dudarev O., Charkin A., Shakhova N. et al. East Siberian Sea: interannual heterogeneity of the suspended particulate matter and its biogeochemical signature // *Progress in Oceanography*. 2022. Vol. 208. 102903.
13. Gordeev V.V., Pokrovsky O.S., Zhulidov A.V. et al. Dissolved Major and Trace Elements in the Largest Eurasian Arctic Rivers: Ob, Yenisey, Lena, and Kolyma // *Water*. 2024. Vol. 16. 316.
14. Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. Модель формирования стока для бассейна реки Амур // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45, № 2. С. 121–132.
15. Махинов А.Н., Лю Ш., Ким В.И., Махинова А.Ф. Особенности больших наводнений на реке Амур в период высокой водности 2009–2021 гг. // *Тихоокеанская география*. 2023. № 1. С. 66–74.
16. Левшина С.И. Органическое вещество поверхностных вод бассейна Среднего и Нижнего Амура. Владивосток: Дальнаука, 2010. 145 с.

17. Guo L., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: implications for terrestrial organic carbon export // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. Vol. 18. GB1036.
18. Vonk J.E., Sánchez-García L., Semiletov I. et al. Molecular and radiocarbon constraints on sources and degradation of terrestrial organic carbon along the Kolyma paleoriver transect, East Siberian Sea // *Biogeosciences*. 2010. Vol. 7. P. 3153–3166.
19. Упоров Г.А. Особенности экстремального наводнения в бассейне Амура летом 2013 года // *Вестник ДВО РАН*. 2014. № 5. С. 58–64.
20. Жабин И.А., Абросимова А.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А. Влияние стока р. Амур на гидрологические условия Амурского лимана и Сахалинского залива Охотского моря в период весенне-летнего паводка // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 4. С. 93–100.
21. Finlay J.C., Kendall C. Stable Isotope Tracing of Temporal and Spatial Variability in Organic Matter Sources to Freshwater Ecosystems. In: *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. Oxford, U.K.: Blackwell, 2008. P. 283–333. DOI: 10.1002/9780470691854.ch10.
22. Carreira R.S., Wagener A.L.R., Readman J.W. et al. Changes in the sedimentary organic carbon pool of a fertilized tropical estuary, Guanabara Bay, Brazil: an elemental, isotopic and molecular marker approach // *Mar. Chem.* 2002. Vol. 79. P. 207–227.
23. Galimov E.M. *Biological Fractionation of Isotopes*. N.Y.; Toronto; London: Academic Press, 1985.
24. Walsh J.J., McRoy C.P., Coachman L.K. et al. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean // *Prog. Oceanog.* 1989. Vol. 22. P. 277–359.
25. Gorbatenko K.M., Lazhentsev A.E., Kiyashko S.I. Seasonal dynamics of the trophic status of zooplankton in the sea of Okhotsk (based on data from stable carbon- and nitrogen-isotope analysis) // *Russ. J. Mar. Biol.* 2014. Vol. 40. P. 519–531.
26. Колтунов А.М., Тищенко П.Я., Звалинский В.И. и др. Карбонатная система Амурского лимана и прилегающих морских акваторий // *Океанология*. 2009. Т. 49, № 5. С. 694–706.
27. Звалинский В.И., Тищенко П.Я., Колтунов А.М. и др. Карбонатная система, гидрохимические и продукционные характеристики нижнего течения реки Амур / ред. В.П. Челомин. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 35–53.

## REFERENCES

1. Dobrovolski S.G. *Global changes in river flow*. Moscow: GEOS (Russia); 2011. 660 p. (In Russ.).
2. Yasuda T., Asahara Y., Ichikawa R. et al. Distribution and transport processes of lithogenic material from the Amur River revealed by the Sr and Nd isotope ratios of sediments from the Sea of Okhotsk. *Progress in Oceanography*. 2014;126:155–167.
3. Seki O., Mikami Y., Nagao S. et al. Lignin phenols and BIT index distributions in the Amur River and the Sea of Okhotsk: Implications for the source and transport of particulate terrestrial organic matter to the ocean. *Progress in Oceanography*. 2014;126:146–154.
4. Shamov V.V., Gartsman V.I., Gubareva T.C., Makagonova M.A. Studies of hydrological response to current climate change at the Russian Far East. *Vestnik of the FEB RAS*. 2014;(2):15–23. (In Russ.).
5. Tachibana Y., Oshima K., Ogi M. Seasonal and interannual variations of Amur River discharge and their relationships to large-scale atmospheric patterns and moisture fluxes. *J. Geophys. Res.* 2008;113. D16102.
6. Gelfan A.N., Kalugin A.S., Motovilov Y.G. Assessing amur water regime variations in the XXI century with two methods used to specify climate projections in river runoff formation model. *Water Resources*. 2018;45(3):307–317. (In Russ.).
7. Kalugin A.S. Runoff formation model of the Amur R. and its application to assess the possible changes in water regime: Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation. Moscow: Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences; 2016. (In Russ.).
8. Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J. et al. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas. *Estuaries Coasts*. 2012;35:369–382.
9. Frey K.E., McClelland J.W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry. *Hydrol. Process*. 2009;23:169–182.
10. Holmes R.M., McClelland J.W., Raymond P.A. et al. Lability of DOC transported by Alaskan rivers to the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.* 2008;35. L03402.

11. Dudarev O.V., Semiletov I.P., Charkin A.N. Particulate material composition in the Lena River–Laptev Sea system: scales of heterogeneities. *Dokl. Earth Sci.* 2006;411A:1445–1451.
12. Dudarev O., Charkin A., Shakhova N. et al. East Siberian Sea: interannual heterogeneity of the suspended particulate matter and its biogeochemical signature. *Progress in Oceanography*. 2022;208. 102903.
13. Gordeev V.V., Pokrovsky O.S., Zhulidov A.V. et al. Dissolved Major and Trace Elements in the Largest Eurasian Arctic Rivers: Ob, Yenisey, Lena, and Kolyma. *Water*. 2024;16. 316.
14. Kalugin A.S., Motovilov Y.G. Runoff formation model for the Amur River basin. *Water Resour.* 2018;45:149–159.
15. Makhinov A.N., Shuguang Liu, Kim V.I., Makhinova A.F. Great floods on the Amur River during the high water period in 2013–2021. *Pacific Geography*. 2023;(1):66–74. (In Russ.).
16. Levshina S.I. Organic matter of surface waters of the middle and lower Amur basin. Vladivostok: Dal'nauka; 2010. 145 P. (In Russ.)
17. Guo L., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: implications for terrestrial organic carbon export. *Global Biogeochem. Cycles*. 2004;18. GB1036.
18. Vonk J.E., Sánchez-García L., Semiletov I. et al. Molecular and radiocarbon constraints on sources and degradation of terrestrial organic carbon along the Kolyma paleoriver transect, East Siberian Sea. *Biogeochemistry*. 2010;7:3153–3166.
19. Uporov G.A. Features of extreme flood in the Amur River basin in summer 2013. *Vestnik of the FEB RAS*. 2014;(5):58–64. (In Russ.).
20. Zhabin I.A., Abrosimova A.A., Dubina V.A., Nekrasov D.A. Influence of the Amur River runoff on the hydrological conditions of the Amur Liman and Sakhalin Bay (Sea of Okhotsk) during the spring-summer flood. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2010;35(4):295–300.
21. Finlay J.C., Kendall C. Stable Isotope Tracing of Temporal and Spatial Variability in Organic Matter Sources to Freshwater Ecosystems. In *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. Oxford, U.K.: Blackwell; 2008. P. 283–333. DOI: 10.1002/9780470691854.ch10.
22. Carreira R.S., Wagener A.L.R., Readman J.W. et al. Changes in the sedimentary organic carbon pool of a fertilized tropical estuary, Guanabara Bay, Brazil: an elemental, isotopic and molecular marker approach. *Mar. Chem.* 2002;79:207–227.
23. Galimov E.M. *Biological Fractionation of Isotopes*. N.Y.; Toronto; London: Academic Press; 1985.
24. Walsh J.J., McRoy C.P., Coachman L.K. et al. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean. *Prog. Oceanog.* 1989;22:277–359.
25. Gorbatenko K.M., Lazhentsev A.E., Kiyashko S.I. Seasonal dynamics of the trophic status of zooplankton in the sea of Okhotsk (based on data from stable carbon- and nitrogen-isotope analysis). *Russ. J. Mar. Biol.* 2014;40:519–531.
26. Koltunov A.M., Tishchenko P.Ya., Zvalinskii V.I. et al. The carbonate system of the Amur estuary and the adjacent marine aquatic areas. *Oceanology*. 2009;49:643–654.
27. Zvalinsky V.I., Tishchenko P.Ya., Koltunov A.M., Shvetsova M.G., Sagalaev S.G. Hydrochemical and productivity characteristics of Amur River estuary. In: *Condition of marine ecosystems influenced by the Amur River flow*. Vladivostok: Dal'nauka; 2009. P. 35–53. (In Russ.)