

КАЧЕСТВО И ОХРАНА ВОД,  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 556.531.4

ОСОБЕННОСТИ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА РЕК В БАССЕЙНАХ ВОЛГИ,  
ОБИ И ЛЕНЫ<sup>1</sup>

© 2011 г. А. В. Гончаров\*, В. А. Исаев\*, Е. Е. Лобченко\*\*, И. П. Ничипорова\*\*

\*Московский государственный университет

119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

\*\*Гидрохимический институт

344090 Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 198

Поступила в редакцию 19.07.2010 г.

Выявлена тесная отрицательная связь содержания кислорода в зимнее время с географической широтой для рек бассейнов Оби и Волги. Это объясняется увеличением с юга на север продолжительности периода ледостава, в течение которого кислород расходуется на окисление органических веществ в воде и донных отложениях. При этом поступление кислорода из атмосферы и в результате фотосинтеза практически отсутствует. В реках бассейна Лены зимой не наблюдается обратная связь растворенного в воде кислорода с широтой, поскольку в реках горного и полугорного типов, характерных для этого бассейна, органические вещества в донных отложениях не накапливаются и условия атмосферной аэрации лучше, чем в равнинных реках. Амплитуда сезонных изменений кислорода в равнинных реках больше, чем в горных, что обусловлено резким снижением кислорода в медленнотекущих реках зимой и насыщением их вод кислородом при фотосинтезе летом.

*Ключевые слова:* растворенный кислород, реаэрация воды, горные реки, равнинные реки, продукция и деструкция ОВ, продолжительность периода ледостава.

В реках в результате турбулентного перемешивания осуществляется активная реаэрация воды – происходит поступление  $O_2$  из атмосферы при недосыщении воды этим газом и удаление его из воды в случае пересыщения. По этой причине можно было бы ожидать сходных концентраций  $O_2$  во многих водотоках. Однако влияние физико-географических факторов (климатических, орографических, почвенных, геохимических, гидрологических) создает предпосылки для формирования существенных различий в кислородном режиме рек.

Наиболее сильно должны различаться по содержанию растворенного в воде  $O_2$  реки горных, предгорных и равнинных областей. От горных рек к равнинным можно ожидать снижение концентрации  $O_2$  вследствие ослабления атмосферной аэрации. В то же время в горных реках реаэрация водной среды должна “заглушать” проявление биологических процессов выделения и потребления  $O_2$ , и процент насыщения им воды должен приближаться к 100%. В отличие от этого, в равнинных реках возможно значительное пересыщение воды  $O_2$  вследствие фотосинтеза.

В зимнее время для многих рек России можно ожидать уменьшения концентрации растворенного

$O_2$  при продвижении с юга на север в связи с увеличением продолжительности ледостава. В реках с повышенной мутностью воды фотосинтез может снижаться вследствие недостатка света для развития водорослей. Повышенное содержание органического вещества (ОВ) во взвеси и в растворенной форме может способствовать уменьшению растворенного в воде  $O_2$  из-за усиления бактериальной деструкции ОВ.

Можно ожидать также, что характер сезонных изменений концентрации  $O_2$  будет в определенной степени связан с типом водного режима рек и зависеть от того, когда происходит половодье – преимущественно в весеннее время или летом, паводки наблюдаются – преимущественно осенью или в течение всего года.

Антропогенные воздействия, имеющие свои особенности в разных физико-географических условиях, могут быть причиной снижения концентрации  $O_2$ . Однако при определенных условиях можно ожидать и противоположного результата. Например, при евтрофировании водных объектов вследствие поступления в них избыточного количества биогенных веществ будет происходить усиление фотосинтеза и пересыщение воды  $O_2$  в летнее время. Поступление в реку подогретых вод зимой может привести к сокращению продолжительности

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-00285-а).

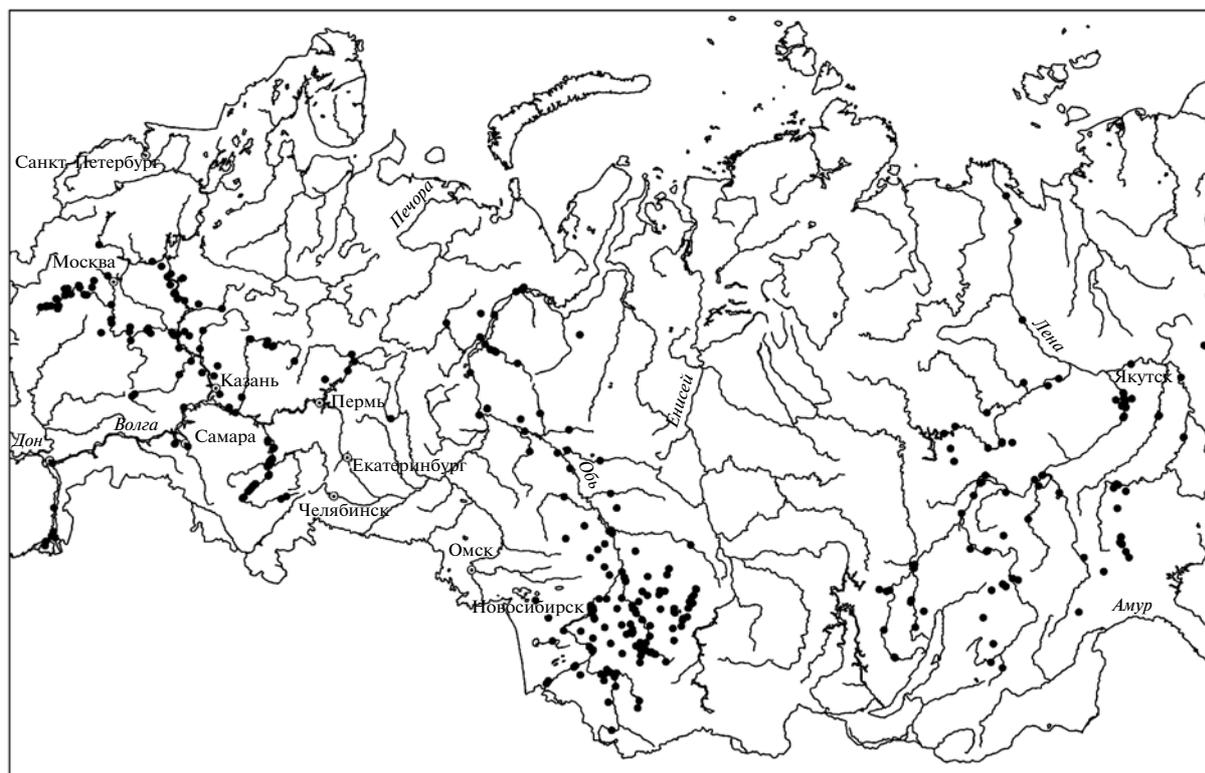


Рис. 1. Карта-схема расположения пунктов наблюдений (темные кружки) на реках в бассейнах Волги, Оби и Лены.

периода ледостава и, вследствие этого, – к увеличению содержания  $O_2$ .

В данной статье авторы не претендуют на решение всех затронутых выше проблем и рассматривают некоторые географические особенности формирования кислородного режима рек, выявившиеся при анализе материалов многолетних наблюдений Росгидромета в бассейнах Волги, Оби и Лены. В работе использованы данные о процентном насыщении воды  $O_2$  по 122 постам в бассейне Волги (за 1981–1997 гг.), 156 постам в бассейне Оби (1988–2008 гг.) и по 93 постам в бассейне Лены (1988–2008 гг.); в отдельные годы имеются пропуски данных. Определение концентрации  $O_2$  проводилось методом Винклера [5]. Используемые авторами данные о процентном насыщении воды  $O_2$  позволяют учесть влияние температуры и выявить роль биологических факторов в формировании кислородного режима рек.

Схема расположения пунктов наблюдения показана на рис. 1. Наблюдения проводились на 48 реках в бассейне Волги (наиболее крупные из них – Волга, Белая, Ветлуга, Вятка, Жиздра, Зуша, Кама, Москва, Ока, Протва, Сура), на 83 реках в бассейне Оби (Обь, Бия, Вах, Казым, Катунь, Кеть, Кия, Подуй, Северная Сосьва, Томь, Чулым и др.), на 43 ре-

ках в бассейне Лены (Лена, Алдан, Амга, Вилюй, Витим, Киренга, Олекма, Чара и др.).

Станции отбора проб располагались как выше, так и ниже источников загрязнения рек – различных населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Проведенный авторами предварительный анализ в целом не выявил существенных различий в содержании  $O_2$  выше и ниже населенных пунктов (по средним для всей базы данных значениям), что может быть связано с упоминавшейся выше неоднозначной реакцией кислородного режима рек на антропогенное воздействие. Поэтому в данной статье не проводится подразделение участков рек по их подверженности антропогенному воздействию.

На рис. 2 представлены графики сезонных изменений содержания растворенного  $O_2$  в реках бассейнов Волги, Оби и Лены, построенные по средним многолетним значениям (для всех станций наблюдений) (рис. 1). Видно, что общий ход  $O_2$  в реках разных регионов сходен – максимум наблюдается в летнее время, минимум – в период ледостава (перед сходом льда).

В теплый сезон года насыщение воды  $O_2$  достигает наибольших значений вследствие активности процессов фотосинтеза и атмосферной аэрации.

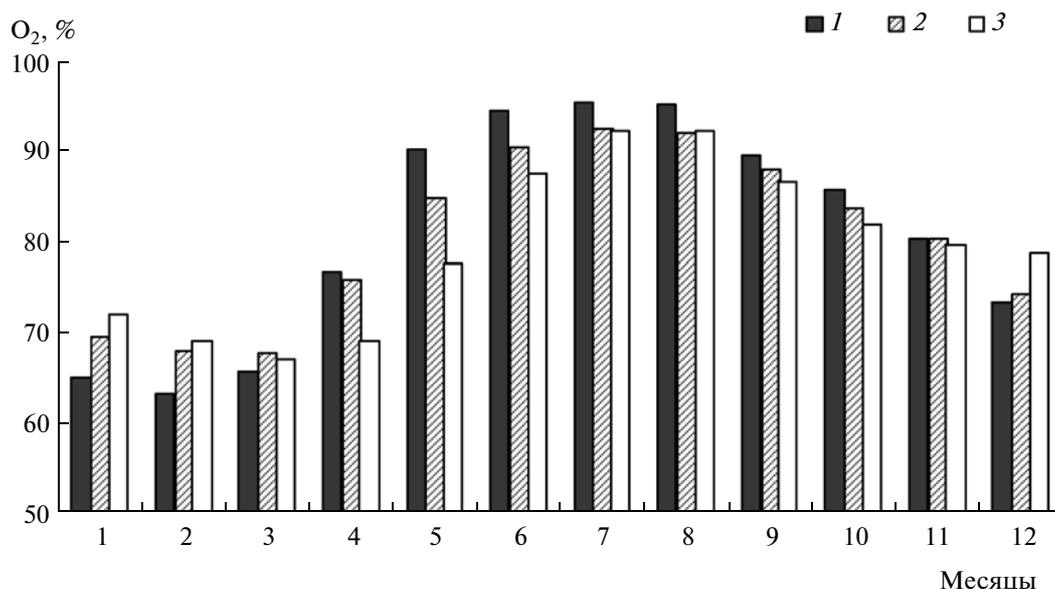


Рис. 2. Сезонные изменения растворенного O<sub>2</sub> в реках бассейна Волги 1, Оби 2 и Лены 3.

Затем до середины осени концентрация O<sub>2</sub> в речных водах плавно снижается: в завершающую стадию переходит годовая сукцессия планктонного сообщества, уменьшается приток солнечной радиации, на многих реках учащаются паводки, повышающие мутность воды и приток аллохтонного ОВ, на биодеструкцию которого расходуется значительное количество O<sub>2</sub>. После установления на реках ледового покрова в ноябре–декабре содержание O<sub>2</sub> снижается еще больше. Растворенный в воде O<sub>2</sub> затрачивается на дыхание гидробионтов, потребляющих ОВ, а его восполнение почти полностью отсутствует. В районах с континентальным климатом нередки случаи полного перемерзания рек, а в районах с низменным рельефом и обилием болот – заморы в результате развития процессов окисления ОВ. Например, на Нижней и Средней Оби в зимнее время содержание O<sub>2</sub> нередко снижается до ≤10–15%. Минимальные концентрации O<sub>2</sub> наблюдаются в месяцы, предшествующие вскрытию рек – в марте и феврале.

На рис. 2 видно, что вода недонасыщена по O<sub>2</sub>. В этом проявляется “гетеротрофность” рек – превышение деструкции ОВ над фотосинтезом вследствие поступления с водосбора большого количества ОВ [4].

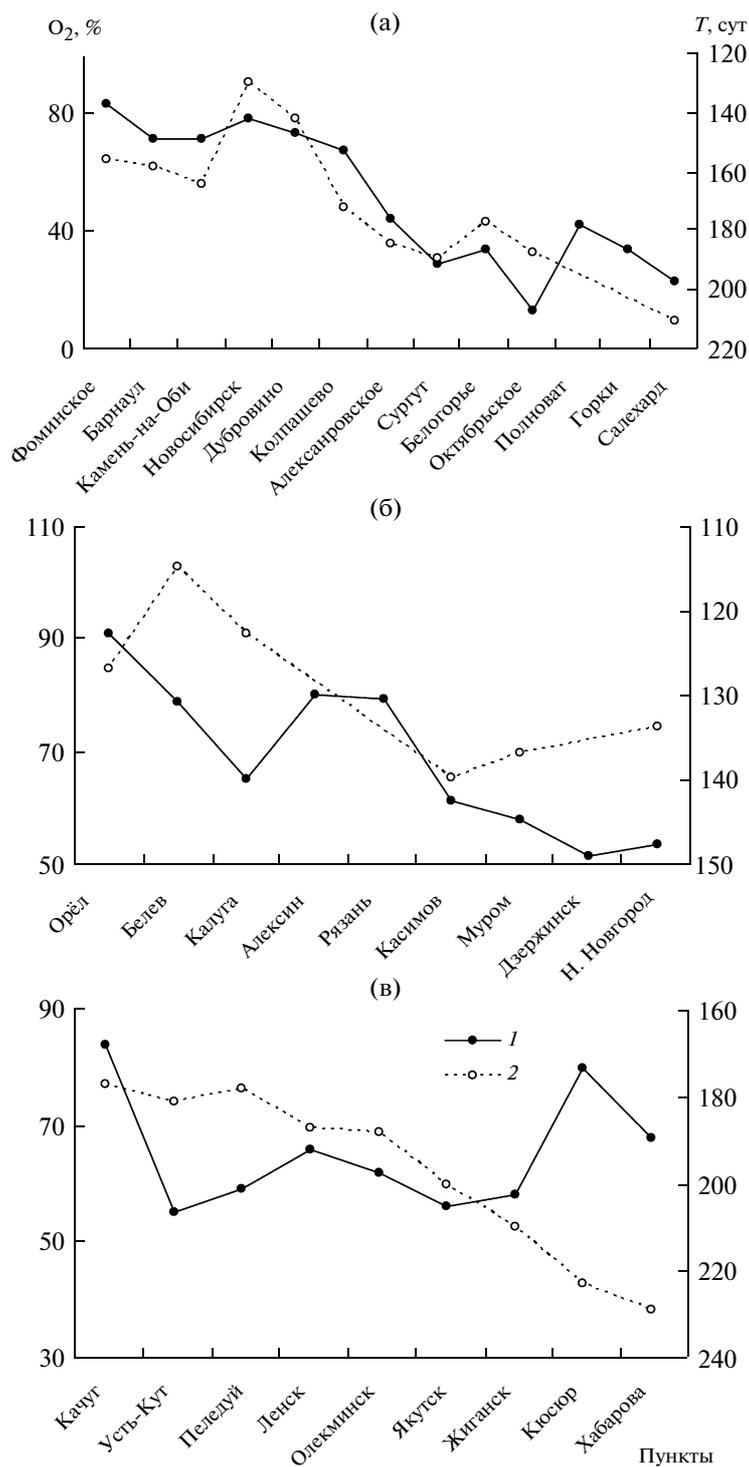
Вместе с тем, на рис. 2 видны и различия. Так, достижение максимальных значений насыщения воды O<sub>2</sub> в бассейне Волги приходится на июнь, в бассейне Оби – на июль и Лены – на июль–август, что может быть связано с разным географическим положением рассматриваемых бассейнов. Для рек Волжского бассейна характерны наибольшие кон-

центрации O<sub>2</sub> в летнее время и наименьшие – зимой. Реки бассейна Лены, напротив, отличаются наибольшим (по сравнению с двумя другими бассейнами) содержанием O<sub>2</sub> в зимний период и наименьшим в летний. Реки бассейна Оби занимают в этом отношении промежуточное положение.

Для того чтобы более детально охарактеризовать эти особенности, рассмотрим данные по отдельным рекам. Наиболее ярким примером является р. Обь, бассейн которой расположен сразу в нескольких высотных зонах: истоки Оби, реки Бия и Катунь находятся в горах и предгорьях Алтая; в среднем течении Обь, минуя Кулундинскую равнину и Салаирский кряж, выходит на Васюганскую равнину, а в нижнем течении дренирует низменную и болотистую Западно-Сибирскую равнину.

На рис. 3а представлены данные об изменении содержания O<sub>2</sub> по длине р. Оби накануне схода льда – в марте, когда насыщение воды O<sub>2</sub> обычно минимально. Видно, что содержание O<sub>2</sub> снижается вниз по течению реки; это можно объяснить увеличением продолжительности ледостава с юга на север. Действительно, период ледостава в Барнауле составляет 158, а в Салехарде – 210 сут (рис. 3а).

Коэффициент корреляции между содержанием O<sub>2</sub> в марте и продолжительностью ледостава составляет –0.85, а уравнение связи между ними позволяет установить, что при увеличении периода ледостава в р. Оби на 10 сут величина насыщения воды O<sub>2</sub> уменьшается на 9%. Продолжительность ледостава в значительной степени зависит от количества приходящей к поверхности Земли солнечной радиации, которая в свою очередь



**Рис. 3.** Изменение содержания  $O_2$  в марте и продолжительности периода ледостава  $T_{вниз}$  по течению рек Оби (а), Оки (б), Лены (в). 1 – содержание кислорода, 2 – продолжительность ледостава.

определяется географической широтой. Поэтому имеет смысл определить связь между содержанием  $O_2$  и широтой места наблюдения; коэффициент корреляции между ними составляет для р. Оби  $-0.91$ . Подсчеты показывают, что при про-

движении с юга на север на 1 град. насыщение воды  $O_2$  в р. Оби в марте снижается в среднем на 4.5%; на некоторых участках эта величина может быть больше, например, для отрезка Колпашево–Октябрьское  $\sim 12\%$ .

Изменение коэффициентов корреляции между содержанием  $O_2$  и географической широтой в течение года ( $n$  – число значений)

Реки	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	$n$
Обь	-0.88	-0.92	-0.91	-0.82	-0.65	0.03	-0.10	-0.07	0.14	-0.49	-0.67	-0.35	13
Ока	-0.88	-0.88	-0.92	-0.82	-0.61	-0.26	0.35	-0.23	-0.02	-0.35	-0.13	-0.54	9
Лена	0.76	0.69	0.05	0.37	-0.44	-0.18	0.10	-0.12	0.21	0.43	0.16	0.73	13
Реки бассейна Оби	-0.77	-0.79	-0.73	-0.79	-0.56	-0.01	0.04	0.03	0.03	-0.25	-0.52	-0.51	156
Реки бассейна Волги	-0.60	-0.53	-0.62	-0.73	-0.48	-0.28	-0.24	-0.24	-0.23	-0.38	-0.47	-0.65	122
Реки бассейна Лены	0.61	0.34	0.01	-0.32	-0.47	-0.18	0.05	-0.08	0.07	-0.11	0.04	0.07	93

Сокращение продолжительности ледостава (вместе с увеличением содержания  $O_2$ ) в районе г. Новосибирска можно объяснить влиянием Новосибирского водохранилища. Это влияние сохраняется, как видно из рис. 3а, и в с. Дубровино, расположенном в 110 км ниже плотины Новосибирского водохранилища. Уменьшение продолжительности ледостава в с. Белогорье по сравнению с расположенным выше по течению г. Сургутом можно объяснить тем, что в этом месте Обь течет в западном направлении и Белогорье оказывается в районе с менее суровым климатом, чем г. Сургут. Кроме того,

существенное влияние на температурный и газовый режим Оби в районе Белогорья оказывает р. Иртыш, устье которого расположено всего в 15 км выше этого села.

Резкое снижение содержания  $O_2$  на участке с. Александровское–с. Октябрьское объясняется тем, что именно здесь в реку поступает наибольшее количество обедненных по  $O_2$  и содержащих большое количество ОВ болотных вод Среднеобской низменности.

После схода льда, который начинается с верховьев, воды Оби быстро пополняются  $O_2$  из атмосферы, а также в результате фотосинтеза, поэтому в летнее время здесь не наблюдается снижения  $O_2$  вниз по течению реки, как это имеет место зимой. Соответственно нарушается связь между содержанием  $O_2$  и географической широтой (таблица).

Сходный с Обью характер изменения содержания  $O_2$  вниз по течению наблюдается на крупной незарегулированной реке в бассейне Волги – Оке. Река следует по Среднерусской возвышенности в северном направлении, а затем, поворачивая на восток и северо-восток, принимает в себя богатые по ОВ воды Мещерской низменности. Содержание  $O_2$  в Оке зимой уменьшается как вниз по течению реки, так и по мере возрастания широты места (рис. 3б, таблица). Причины увеличения содержания  $O_2$  на участке Алексин–Рязань еще предстоит выяснить; частично это можно объяснить отепляющим влиянием р. Москвы, в результате чего сокращается период ледостава на участке р. Оки выше Рязани. Коэффициент корреляции между продолжительностью ледостава и содержанием  $O_2$  в марте

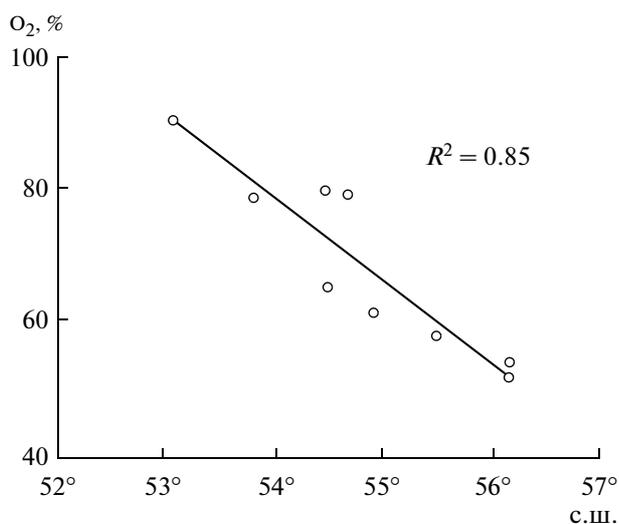


Рис. 4. Связь между содержанием  $O_2$  в водах р. Оки в марте и географической широтой места наблюдения.

составляет  $-0.61$  (при небольшом количестве пар данных это значение малодостоверно).

Связь содержания  $O_2$  с географической широтой для р. Оки довольно существенна ( $r = -0.92$ ) (рис. 4). Можно уточнить, что при продвижении с юга на север на 1 град. насыщение воды по  $O_2$  в р. Оке в марте снижается в среднем на 12.4%. Из таблицы видно, что тесная связь содержания  $O_2$  с широтой ( $r = -0.82 \dots -0.92$ ) сохраняется в период ледостава с января по апрель. После схода льда связь “размывается” и исчезает, а поздней осенью и в начале зимы восстанавливается вновь. Сходным образом ведут себя рассматриваемые показатели на многих реках в бассейнах Волги и Оби (табл. 1), и это представляет закономерным.

В то же время из табл. 1 видно, что на р. Лене рассматриваемая связь нарушается. Для этой реки зимой не характерно снижение содержания  $O_2$  с юга на север. На рис. 3в видно, что вниз по течению реки в целом не происходит снижения содержания  $O_2$  – и это при том, что Лена простирается почти на 2000 км в меридианальном направлении, а разница в продолжительности ледостава на юге и на севере составляет  $\sim 2$  мес. Причина этого в том, что большая часть бассейна Лены располагается в горных и полугорных районах. Поэтому сама река и ее притоки характеризуются высокой скоростью течения, которая препятствует накоплению  $OB$  на дне, как это имеет место в равнинных реках. Донные отложения рек Ленского бассейна представлены в основном галечно-валунными и галечно-песчаными грунтами [2]. В бассейне Лены отсутствуют такие значительные источники поступления аллохтонного  $OB$ , как болота Среднеобской низменности (для Оби) или Мещерская низменность (для Оки). Поэтому здесь нет условий для значительного потребления  $O_2$  в процессе деструкции  $OB$ . При этом высокая скорость течения, особенно характерная для порожистых участков р. Лены и ее притоков, может способствовать образованию промоин [3], через которые вода насыщается  $O_2$  из атмосферы. По-видимому, сочетание этих двух факторов (малое количество  $OB$  и большая скорость течения) – причина достаточно высокого содержания  $O_2$  в р. Лене зимой на всем ее протяжении.

В то же время летом в р. Лене и ее горных притоках обычно не наблюдается пересыщения воды  $O_2$ . Это связано с тем, что фитопланктон в реках с быстрым течением развит очень слабо и выделение  $O_2$  при фотосинтезе незначительно. Средняя за вегетационный сезон биомасса фитопланктона в р. Лене у г. Якутска значительно меньше 1 мг/л [1], что соответствует олиготрофному состоянию водных объектов. Кроме того, мощная атмосферная реаэрация

в бурных потоках препятствует пересыщению воды газом. В равнинных реках с медленным течением, напротив, фитопланктон летом развит достаточно сильно, и в них нередко может наблюдаться содержание  $O_2 > 100\%$ .

Эти особенности отражены на рис. 5а, где представлены сезонные изменения содержания  $O_2$  в реках равнинных и горных областей бассейна Оби; а на рис. 5б представлены горная р. Алдан (приток р. Лены) и равнинная р. Ока в нижнем течении (у г. Дзержинск).

Из рисунков видно, что в горных реках (по сравнению с равнинными)  $O_2$  много зимой и мало летом, а в равнинных – наоборот, много летом и мало зимой. Поэтому горные и равнинные реки существенно различаются амплитудой внутригодовых изменений  $O_2$ , на что прежде уже обращалось внимание при рассмотрении рис. 1. Подсчет показывает, что наибольшей изменчивостью значений содержания  $O_2$  характеризуются реки Волжского бассейна – стандартное отклонение составляет 21.9% насыщения, для бассейнов Оби и Лены эта величина равна 20.1 и 17.4% соответственно. Если подразделить бассейн Оби на горную и равнинную области (по  $56^\circ$  с.ш.), то окажется, что стандартное отклонение концентраций  $O_2$  в реках первой области существенно меньше, чем второй – 17.4% насыщения против 25.1%.

## ВЫВОДЫ

Для рек бассейнов Волги и Оби характерна обратная связь содержания растворенного  $O_2$  в зимнее время (в процентах насыщения) с географической широтой; ( $r = -0.62 \dots -0.92$ ). Это объясняется тем, что с юга на север увеличивается продолжительность ледостава, в течение которого  $O_2$  расходуется на окисление  $OB$ , содержащихся в воде и накапливаемых в донных отложениях медленно текущих равнинных рек, а его пополнение из атмосферы и в результате фотосинтеза практически отсутствует.

В то же время содержание  $O_2$  в верхнем течении р. Лены и в ее низовье в конце зимы примерно одинаково. Причина заключается в том, что в реках горного и полугорного типов, характерных для бассейна Лены, условия атмосферной аэрации зимой лучше, чем в равнинных реках. Кроме того, высокая скорость течения препятствует накоплению в донных отложениях  $OB$ , на разложение которого бактериями расходуется  $O_2$ .

Реки разных высотных областей различаются изменчивостью содержания  $O_2$ . В горных районах бассейна Оби стандартное отклонение содержания  $O_2$  в реках составляет 17.4% насыщения, а в равнин-

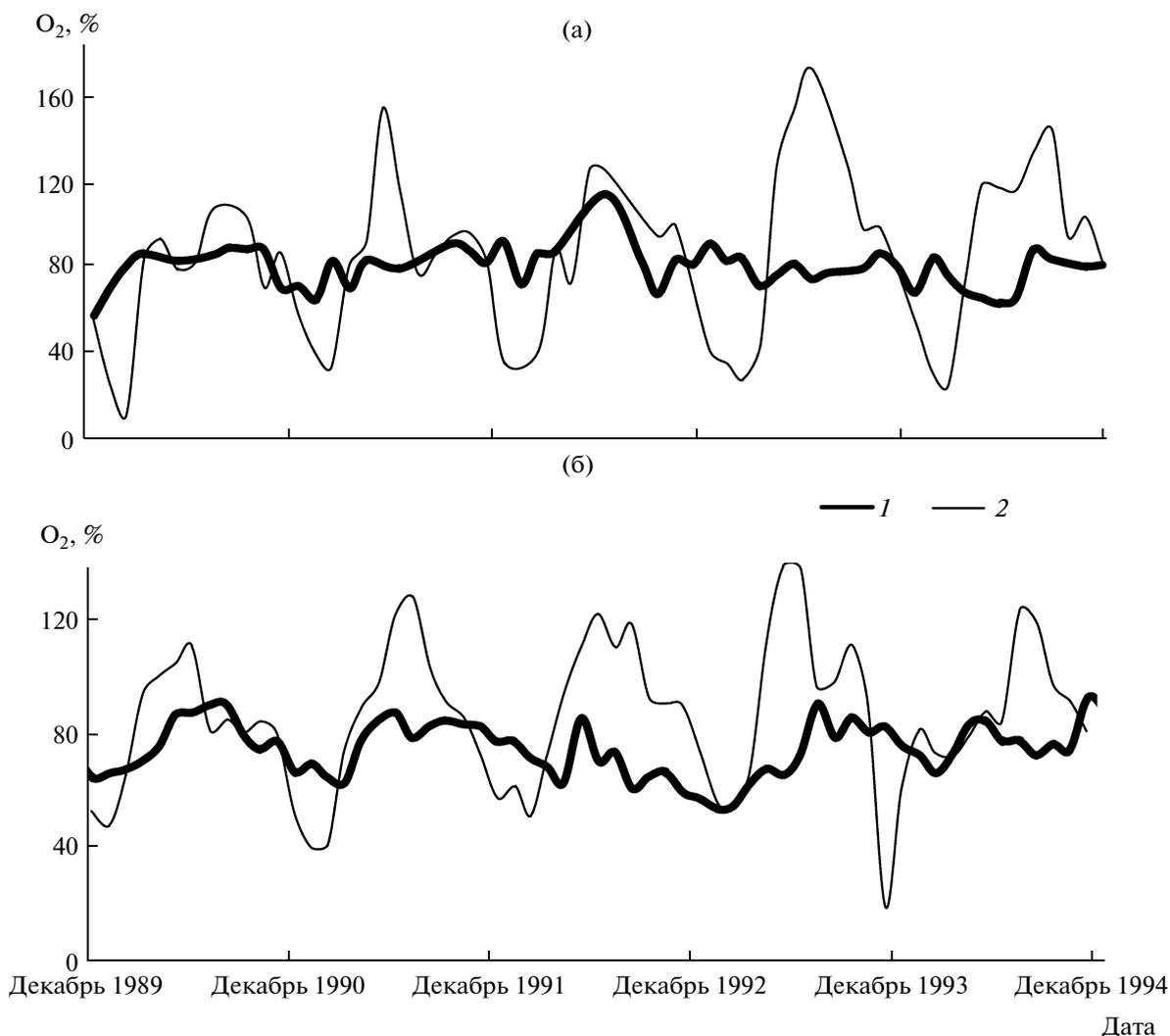


Рис. 5. Сезонные изменения концентраций  $O_2$  в реках горных и равнинных областей: Бия выше г. Бийска 1, Обь у с. Александровское 2 (а), Алдан у г. Томмот 1, Ока у г. Дзержинска 2 (б).

ных – 25.1%. Причина заключается в том, что в равнинных реках амплитуда сезонных изменений значительно больше, чем в горных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габышев В.А. Водоросли планктона реки Лены в зоне влияния г. Якутска. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск, Ин-т биологических проблем криолитозоны СО РАН, 1999. 25 с.
2. Лодина Р.В. Руслообразующие наносы на реках Северной Евразии // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1993. № 6. С. 58–64.
3. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. М.: Высш. шк., 2007. 463 с.
4. Одум Ю. Экология: М.: Мир, 1986. Т. 1. 328 с.; Т. 2. 376 с.
5. РД 52.24.419-2005. Массовая концентрация растворенного кислорода в водах. Методика выполнения измерений йодометрическим методом. Ростов-на-Дону: Вираж, 2005. 22 с.