

© Л.П. ПАНИЧЕВА, Т.И. МОИСЕЕНКО, Т.И. КРЕМЛЕВА,
С.С. ВОЛКОВА

lpanicheva@list.ru, moiseenko@geokhi.ru, kreml-ta@yandex.ru, svolkova2008@mail.ru

УДК 556.461

БИОХИМИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ВОДАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ*

АННОТАЦИЯ. Проведено исследование процессов биохимической трансформации нефтяных углеводородов и нитратов в водах 127 озер (от зоны тундры до лесостепной зоны) на территории Западной Сибири (ЗС). Основными антропогенными источниками загрязнения нефтепродуктами и нитратами являются эксплуатация нефтяных и газовых месторождений и сжигание попутного газа. Для большей части озер ЗС, достаточно удаленных от источников антропогенных загрязнений, самоочищающая способность водоемов в течение летнего периода обеспечивает снижение содержания нефтепродуктов и нитратов до значений ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов. При этом существенно увеличивается содержание органического углерода ($C_{орг}$) и органического азота ($N_{орг}$). Для природных зон ЗС медианное значение $C_{орг}$ варьирует от 4,38 до 26,6 мг/дм³, $N_{орг}$ — от 0,17 до 1,52 мг/дм³. Биохимическая трансформация нефтепродуктов включает анаэробный процесс гумификации и аэробный процесс минерализации. В озерах северных и средних широт ЗС (выше 58° широты) гумификация составляет 80%, минерализация — 20%; в озерах южных широт ЗС (ниже 58° широты) гумификация — 30%, минерализация — 70%. Анаэробное окисление углеводородов и органических остатков сопровождается восстановлением нитратов до нитритов и аммония. Аминирование промежуточных продуктов окисления органических соединений приводит к увеличению содержания органического азота и гумусовых веществ. В природных зонах диапазона северных и средних широт (тундра, лесотундра, северная тайга, средняя тайга) в водах озер содержится значительное количество аммония, что предопределяет доминирование процесса гумификации над процессом минерализации органического вещества. В природных зонах диапазона южных широт (южная тайга, лесостепь) процесс гумификации лимитируется практически полным исчерпанием аммония. Мольное отношение углерода и азота в водных гумусовых веществах: C:N = 23,4 :1.

SUMMARY. Study of biochemical transformation of petroleum hydrocarbons and nitrates in the waters of 127 lakes, (from the tundra to the forest-steppe zone) effect in the territory of Western Siberia (WS). The main anthropogenic sources of pollution by oil products and nitrates are the exploitation of oil and gas exploration and gas

* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, постановление №220 от 09 апреля 2010 г. «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования» (договор № 11.G34.31.0036 от 25.11.2010 г.) и поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение № 14.B37.21.1255).

flaring. For most of the lakes in WS, quite distant from the sources of anthropogenic pollution self-purification capacity water reservoirs during the summer reduces petroleum hydrocarbons and nitrate content to below the maximum permissible concentration (MPC) for the fishery reservoirs. This significantly increases the organic carbon (Corg) and organic nitrogen (Norg). For natural zones of the WS median Corg ranges from 4.38 to 26.6 mg/dm³, Norg — from 0.17 to 1.52 mg/dm³. Biochemical transformation of petroleum products includes anaerobic process of humification and aerobic process of mineralization. In the lakes of the northern and middle latitudes of the WS (above 58° latitude) humification is 80%, mineralization — 20%, in the lakes of the southern latitudes of the WS (below 58° latitude) humification — 30%, mineralization — 70%. Anaerobic oxidation of hydrocarbons and organic remains followed by recovery of nitrate to nitrite and ammonium. Amination of the intermediate products of oxidation of organic compounds leads to increased levels of organic nitrogen and humic substances. In natural areas the range of the northern and middle latitudes (tundra, forest tundra and northern taiga, middle taiga) in the waters of lakes has a significant amount of ammonium, which determines the process of humification dominance over the process of mineralization of organic matter. In natural areas range of southern latitudes (southern taiga, forest-steppe) humification process is limited almost total depletion of ammonium. The molar ratio of carbon and nitrogen in aquatic humic substances: C: N = 23,4: 1.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Нефтяные углеводороды, формы азота, биохимическая трансформация, минерализация, гумификация.

THE KEY WORDS. Petroleum hydrocarbons, nitrogen forms, biochemical transformation, mineralization, humification.

Ключевой проблемой озер Западной Сибири (ЗС) являются значительные объемы поступления нефтяных загрязнений, обусловленные наличием более 500 нефтяных и газовых месторождений.

Наряду с аварийными ситуациями (выбросы из скважин, порывы нефтепроводов, разгерметизация резервуаров и т.п.), обуславливающими, как правило, значительные масштабы нефтезагрязнения окружающей среды, утечка органических веществ за пределы промплощадок происходит за счет миграции и рассеяния и при обычной эксплуатации нефтепромысловых объектов. Кроме того, возможен подток нефтяных загрязнений из нижележащих толщ [1].

Значительные масштабы нефтяных углеводородов (УВ), поступающих в окружающую природную среду при освоении нефтегазовых ресурсов, приводят к тому, что данный вид загрязнения становится приоритетным для севера Западной Сибири.

Особого внимания также заслуживает проблема сжигания попутного газа. Факелы на нефтяных месторождениях являются источником хронического многолетнего загрязнения атмосферы на обширных территориях. При эксплуатации факельных установок в атмосферу попадают сажа, предельные углеводороды (алканы), фенолы, бенз(а)пирен, оксид углерода, оксиды азота и серы, сероводород, тяжелые металлы (ванадий и никель) и другие вещества. Значительный масштаб загрязнений оксидами азота (NO_x) в процессе сжигания топлива обусловлен тем, что эти оксиды образуются не только при взаимодействии O₂ воздуха с азотом, содержащимся в топливе, но и при взаимодействии O₂ воздуха с азотом, содержащимся в воздухе [2-4].

Одновременные выбросы оксидов азота и серы обуславливают выпадение кислотных осадков. Из всего количества кислот, выпавших с дождями в Цен-

тральной Европе, в среднем $2/3$ приходится на серную кислоту и $1/3$ — на азотную. Однако это соотношение может изменяться в зависимости от конкретного места или региона [4]. Соответственно можно ожидать, что для Западной Сибири, особенно на севере, где сосредоточено наибольшее количество факельных площадок, вклад азотной кислоты в состав кислотных осадков будет более значительным.

Большинство загрязнений, обусловленных наличием нефтяных и газовых месторождений и их эксплуатацией, обладает токсичностью. Для оценки самоочищающей способности водоемов и фонового уровня загрязнений, характерных для региона, значительный интерес представляет изучение химического состава вод озер Западной Сибири, достаточно удаленных от основных источников антропогенного воздействия.

Целью данной работы было определение закономерностей биохимической трансформации нефтяных углеводородов и особенностей ее влияния на состояние биогенных элементов, а также образование гумусовых веществ в озерах Западной Сибири.

Экспериментальная часть. В основу работы легли результаты широко-масштабных исследований 127 малых озер (от зоны тундры до лесостепной зоны) на территории Западной Сибири. Работы велись в соответствии с принципами исследований, изложенными в работах [5-6]. В исследованиях соблюдался принцип удаленности от каких либо прямых антропогенных воздействий на озера, обеспечивалась единовременность и сезонная сопоставимость результатов, использовалось современное аналитическое оборудование, а также внутрилабораторный контроль качества измерений.

Определение остаточного содержания нефтепродуктов в водах озер ЗС проводилось спектральными методами. При химико-аналитическом контроле нефтяного загрязнения природных сред использовалось понятие «нефтепродукты» (НП), под которым понимается смесь неполярных и малополярных углеводородов, растворимых в гексане и не сорбирующихся оксидом алюминия.

Для повышения точности анализа содержание алкильных компонент углеводородов проводилось ИК-спектрофотометрическим методом на приборе ИК-Фурье-спектрофотометре ФСМ 1201, а содержание арильных компонент — флуориметрическим методом на приборе Shimadzu RF-5301PC с использованием универсальной 6-компонентной калибровочной смеси [7].

Цветность определяли спектрофотометрическим методом, по хром-кобальтовой шкале цветности при длине волны 380 нм (спектрофотометр UNICO).

Общий азот, общий углерод и органический углерод определялись методом элементного анализа с использованием прибора vario TOC, Elementar. Минеральный углерод (водорастворимые формы) рассчитывался по разнице между общим и органическим углеродом.

Минеральные формы азота (аммоний, нитраты, нитриты) определялись методом ионной хроматографии с помощью ионного хроматографа фирмы DIONIX ICS-2100 с электролитической пробоподготовкой и генерированием элюента, т.е. с технологиями, разработанными для применения электролитически-генерируемых элюентов для всех видов изократического и градиентного разделения в ионной хроматографии с кондуктометрическим детектированием.

По разнице между общим и минеральным азотом (сумма азота в ионах аммония, нитратах и нитритах) рассчитывался азот органический.

Результаты и их обсуждение. В соответствии с принципом устойчивости Ле Шателье-Брауна, если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, воздействовать извне, изменяя какое-либо из условий равновесия, то в ней усиливаются процессы, направленные на компенсацию внешнего воздействия. Одним из вариантов такого внешнего воздействия является изменение концентрации (отклонение от равновесного значения) одного или нескольких компонентов системы [8].

Таким образом, поступление в экосистему избыточного количества углеводородов (УВ) должно сопровождаться интенсификацией процессов их биохимической трансформации.

Остаточное содержание нефтепродуктов определяется балансом между их поступлением и расходом в процессе окислительной деградации. Следует отметить, что нефтяные УВ, составляющие основу нефтяных загрязнений, не являются чуждыми природным экосистемам, поскольку флорой и фауной производятся значительные количества нативных (природных) углеводородов. В природных водоемах есть все необходимые условия для окислительной деградации нефтепродуктов — ультрафиолетовое излучение, наличие растворенного в воде кислорода, а природные бактериоценозы генетически адаптированы к их разрушению [9-10].

Определение остаточного содержания нефтепродуктов в осенний период при температуре воды 4°C, когда снижается скорость всех процессов, определяющих поступление и биотрансформацию углеводородов, позволяет оценить способность водоемов к самоочищению от нефтепродуктов за летний период.

Содержание нефтепродуктов (медианные значения) в водах озер для различных природных зон ЗС представлено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание нефтепродуктов ($X_{\text{нп}}$) в озерах различных природных зон Западной Сибири:

числитель — медиана, знаменатель — пределы содержания

Природная зона	Тундра	Лесотундра	Северная тайга	Средняя тайга	Южная тайга	Лесостепь
n	36	10	21	33	16	11
$X_{\text{нп}}$, мкг/дм ³	41 8÷555	32 8÷177	36 8÷392	20 13÷53	18 14÷36	20 14÷32

Согласно данным табл. 1, остаточное содержание нефтепродуктов и, соответственно, эффективность биохимической трансформации углеводородов зависят от расположения озер в различных климатических и растительных поясах, закономерно сменяющихся с широтой и абсолютной высотой местности. Причиной более высокого остаточного содержания нефтепродуктов в северных зонах может быть более низкая среднегодовая температура и другие особенности природных систем ЗС, определяющие условия поступления, распространения и трансформации нефтяных загрязнений. Вариабельность значений для разных проб в пределах конкретной природной зоны, вероятно, зависит от близости точек отбора к нефтегазовым месторождениям и транспортным магистралям.

Медианные значения остаточного содержания нефтепродуктов для всех природных зон не превышают ПДК для рыбохозяйственных водоемов (менее 50 мкг/дм³) [11]. Для половины исследованных озер, достаточно удаленных от источников антропогенного загрязнения, в южных природных зонах в осенний период остаточное содержание нефтепродуктов снижается до 20 мкг/дм³, которое практически можно считать фоновым.

Остаточное содержание нитратов в природных водах определяется балансом между их поступлением и расходом в процессах денитрификации и диссимиляционной аммонификации. В работе [12] показано, что участвующие в круговороте азота микроорганизмы под влиянием нефтяного загрязнения в небольших дозах получают стимул к развитию вследствие внесения в почву свежего органического материала.

В результате *денитрификации нитратов* образуется либо NH₄⁺, либо N₂, который выделяется в атмосферу. Этот процесс протекает с высвобождением NO и N₂O в качестве побочных продуктов, которые также поступают в атмосферу. Процесс сопровождается использованием нитратов и продуктов их частичного восстановления вместо кислорода для окисления веществ (как органических, так и минеральных) с выделением энергии (анаэробное дыхание) [13].

Нитрат восстанавливается до нитрита с помощью молибденсодержащего фермента нитратредуктазы. Для восстановления нитритов есть два пути [14]:

— NO-образующая нитритредуктаза восстанавливает нитрит до оксида азота (II). Это одна из стадий денитрификации.

— NH₃-образующая нитритредуктаза восстанавливает нитрит до иона аммония, что является заключительной стадией диссимиляционного восстановления нитратов в аммоний или, как его называют в зарубежных источниках, диссимиляционной или дыхательной аммонификации. Это дыхание конкурирует с энергетически более выгодным аэробным и подавляется кислородом.

Результаты определения содержания (медианные значения) нитрат-, нитрит-ионов и ионов аммония в водах озер для различных природных зон ЗС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание минеральных форм азота в озерах различных природных зон Западной Сибири:

числитель — медиана, знаменатель — пределы содержания

Природная зона	Тундра	Лесотундра	Северная тайга	Средняя тайга	Южная тайга	Лесостепь
п	36	10	21	33	16	11
NO ₃ , мг/дм ³	1.11 0.005-8.95	0.68 0.072-1.91	0.94 0.046-2.35	0.35 0.019-6.84	1.90 0.017-7.82	0.27 0.12-4.48
NO ₂ , мг/дм ³	0,009 0-0.75	0,008 0.002-0.011	0,010 0.002-1.72	0,011 0-0.26	0,002 0.001-0.22	0,76 0.004-1.57
NH ₄ , мг/дм ³	0.13 0.010-0.41	0.078 0.010-1.11	0.14 0.011-1.53	0.26 0.011-1.23	0.025 0.011-0.73	0.022 0-1.34

Согласно данным табл. 2, все полученные данные по содержанию нитратов значительно меньше ПДК для рыбохозяйственных водоемов (менее 40 мг/дм³); медианные значения для всех природных зон меньше ПДК для вод Байкала

(менее 5 мг/дм³). Для ряда озер содержание нитритов и аммония превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов (более 0.08 мг/дм³ и 0.5 мг/дм³, соответственно). Медианные значения по содержанию нитритов и аммония ниже ПДК, за исключением медианного содержания нитритов в зоне лесостепи.

Наименьшие медианные значения содержания ионов аммония наблюдаются для южных зон — южной тайги и лесостепи (табл. 2). Наиболее вероятно, что в этих зонах природно-климатические условия являются более благоприятными для аэробного окисления органических субстратов по сравнению с анаэробным окислением, когда в качестве акцепторов электронов используются альтернативные кислороду соединения — нитраты и нитриты. При этом в зоне южной тайги сохраняется значительное количество нитратов, а в зоне лесостепи нитраты преимущественно восстанавливаются до нитритов (табл. 2).

Содержание органического вещества в природных водах зависит от эффективности процесса гумификации углеводородов и органических остатков отмершей биоты. При этом образуются гумусовые вещества (ГВ), имеющие полимерное строение и по этой причине достаточно устойчивые к разложению и окислению.

Содержание общего органического углерода ($C_{\text{орг}}$, по зарубежным источникам — Total Organic Carbon (ТОС)) — достаточно надежный показатель содержания в воде органических веществ, в среднем численно равный 50% массы органических веществ. Не менее важным показателем является содержание органического азота (N_{орг}). Результаты определения содержания C_{орг} и N_{орг} (медианные значения) в водах озер для различных природных зон ЗС приведены в табл. 3.

Таблица 3

Содержание органического углерода и органического азота в озерах различных природных зон Западной Сибири: числитель — медиана, знаменатель — пределы содержания

Природная зона	Тундра	Лесотундра	Северная тайга	Средняя тайга	Южная тайга	Лесостепь
п	36	10	21	33	16	11
C _{орг} , мг/дм ³	4.38 1.25-10.8	12.1 8.18-14.6	7.27 2.21-24.1	11.4 1.52-20.3	13.7 7.04-20.7	26.6 19.0-39.4
N _{орг} , мг/дм ³	0.17 0.0001-0.86	0.35 0.15-0.69	0.28 0.004-0.70	0.27 0.001-0.73	0.79 0.002-0.99	1.52 1.06-2.57

Следует отметить, что содержание органического углерода и органического азота в природных зонах ЗС (табл. 3), подверженных загрязнению нефтепродуктами, выше, чем в природных зонах европейской территории России [6].

Полученные результаты согласуются с известными литературными данными. Например, при изучении подземных вод из районов Башкирии, Ухты, Средней Азии, Кубанской нефтеносной области и др. были выявлены показатели, характерные для вод, связанных с нефтью, в том числе — повышенное (относительно фона) содержание органического углерода и органического азота, возрастающее по мере приближения к залежи [15].

Важнейшей стадией образования гумусовых веществ (ГВ), в том числе фульво- и гуминовых кислот, является процесс поликонденсации оксикарбоновых кислот и аминокислот различного строения, от соотношения которых возможно варьирование мольного отношения C:N в составе ГВ.

Для вод озер Западной Сибири наблюдается корреляция с $R^2 = 0,63$ между содержанием органического азота и содержанием органического углерода с примерным соотношением $0,0497 \text{ мгN}/1\text{мгC}$ (рис. 1), что соответствует мольному отношению C:N = 23,4:1 в составе водорастворимого органического вещества (РОВ).

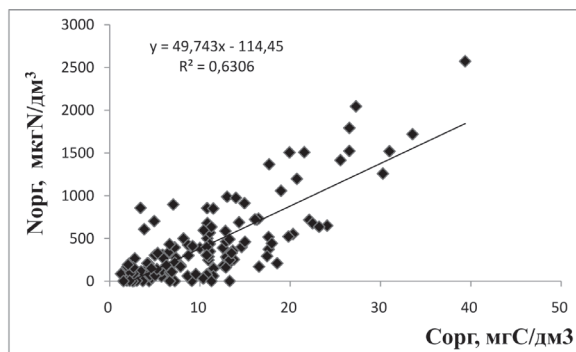


Рис. 1. Содержание органического азота ($N_{\text{орг}}$) в зависимости от содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в озерах ЗС

Полученное соотношение достаточно хорошо согласуется с данными о среднем элементном составе гуминовых (ГК) и фульвокислот (ФК), выделенных из природных вод [16]. Расчет по данным массового содержания элементов позволяет оценить мольное соотношение для ГК ($n=56$): C:N = 23:1; для ФК ($n=63$): C:N = 23,7:1.

Цветность вод в озерах северных и средних широт ЗС достаточно хорошо коррелирует с содержанием $C_{\text{орг}}$ (рис. 2).

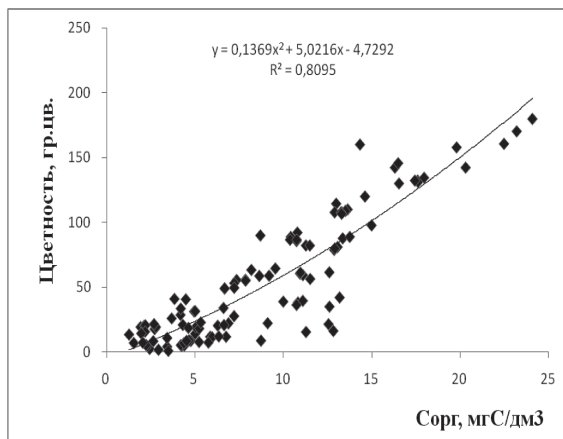


Рис. 2. Зависимость цветности вод от содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в озерах северных и средних широт ЗС

Механизмы биохимической трансформации нефтепродуктов в природных водах. С использованием метода газожидкостной хроматографии экспериментально доказано, что трансформация нефтепродуктов протекает через реакции гидрирования, дегидрирования, гидроксирования, оксосинтеза, карбоксилирования, декарбоксилирования, этерификации, гидролиза и конденсации, совокупность которых приводит к деградации углеводородного субстрата [17]. При окислительной деградации возможно образование продуктов промежуточного окисления углеводородов — спиртов, альдегидов, кетонов, карбоновых кислот, сложных эфиров, а также бифункциональных соединений — альдегидокислот, кетокислот и др. Следует отметить, что в природных условиях микроорганизмы осуществляют процессы окисления как за счет аэробного, так и анаэробного дыхания [13].

Оптимальным способом ликвидации избытка углеводородов было бы их полное окисление до CO_2 и H_2O (процесс минерализации) с последующим удалением CO_2 в атмосферу или в виде карбонатных соединений, — в литосферу. Однако если образование CO_2 происходит в воде, то он практически полностью растворяется, что приводит к увеличению содержания в воде минерального углерода (CO_3^{2-} , HCO_3^-).

Кроме того, процесс гумификации продуктов промежуточного окисления углеводородов также является эффективным способом биохимической трансформации нефтяных углеводородов. В работе [18] предложена концепция восстановления нефтезагрязненной почвы, основанная не на удалении загрязнителя путем деструкции до CO_2 и H_2O , а на трансформации соединений нефти в нетоксичные гуминоподобные соединения, что позволяет ускорить сроки ремедиации нарушенных биоценозов.

Возможность процесса гумификации обусловлена тем, что при недостатке растворенного кислорода возможно анаэробное окисление углеводородов нитратами и нитритами с образованием аммония. Восстановительное аминирование промежуточных продуктов окисления углеводородов с образованием азотсодержащих органических соединений, в том числе аминокислот, предопределяет возможность включения избыточного углерода в состав водорастворимого органического вещества (процесс гумификации).

Механизм, при помощи которого осуществляется синтез аминокислот из α -кетокислот и аммиака, был назван А.Е. Браунштейном **трансреаминированием**. Сущность его сводится к восстановительному аминированию α -кетоглутаровой кислоты с образованием глутаминовой кислоты (реакцию катализирует глутаматдегидрогеназа) и к последующему трансаминированию глутамата с любой α -кетокислотой. В результате образуется L-аминокислота, соответствующая исходной кетокислоте, и вновь освобождается α -кетоглутаровая кислота, которая может акцептировать новую молекулу аммиака. Эта система включения аммонийного азота в органические соединения с использованием трансфера аминогрупп у многих бактерий и растений создается и используется в тех случаях, когда концентрация ионов аммония в среде очень мала (меньше 1 мМ/л), а также при фиксации N_2 [19]. Можно отметить также, что открытие бактерии *Corynebacterium glutamicum*, выделяющей L-глутаминовую кислоту, положило начало новой эпохе в промышленном использовании процессов неполного окисления углеводов и углеводородов для синтеза аминокислот [20].

О соотношении процессов минерализации (аэробный процесс) и гумификации (анаэробный процесс) углеводов и органических остатков отмершей биоты можно судить по содержанию в воде минерального ($C_{\text{мин}}$) и органического ($C_{\text{орг}}$) углерода

На рис. 3 представлены данные по содержанию органического и минерального углерода в озерах ЗС в широтном градиенте.

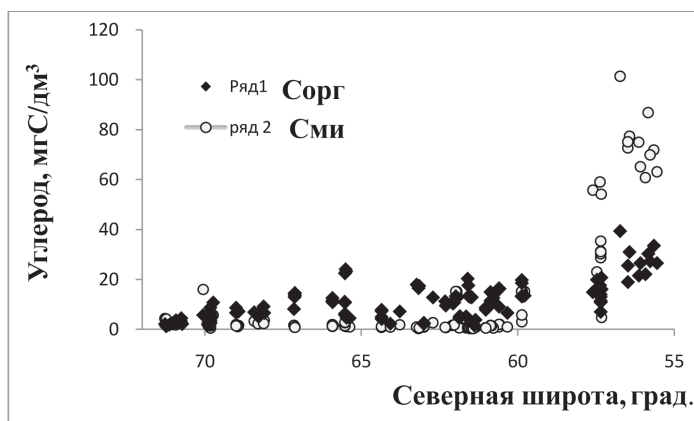


Рис. 3. Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) и минерального углерода ($C_{\text{мин}}$) в озерах Западной Сибири в широтном градиенте

С учетом полученных данных (рис. 3) весь исследованный диапазон широт ЗС можно условно разделить на две области: диапазон северных и средних широт (ССШ) (выше 58° широты) и диапазон южных широт (ЮШ) (ниже 58° широты). В озерах диапазона ССШ процесс гумификации преобладает над процессом минерализации ($C_{\text{орг}} > C_{\text{мин}}$), в среднем гумификация — 80%, минерализация — 20%, тогда как в озерах диапазона ЮШ процесс минерализации преобладает над процессом гумификации ($C_{\text{орг}} < C_{\text{мин}}$), в среднем гумификация — 30%, минерализация — 70%.

Таким образом природно-климатические условия и содержание растворенного кислорода для озер диапазона ССШ более благоприятны для протекания анаэробных процессов, а для озер диапазона ЮШ — аэробных.

Эффективность процесса аминирования промежуточных продуктов окисления органических соединений и, соответственно, гумификации, зависит от содержания в системе иона аммония, образующегося в процессе диссимиляционного восстановления нитратов и анаэробного окисления углеводов и органических остатков. Согласно данным табл. 2 и рис. 4 в природных зонах диапазона ССШ (тундра, лесотундра, северная тайга, средняя тайга) в водах озер содержится значительное количество аммония, что предопределяет доминирование процесса гумификации над процессом минерализации органического вещества.

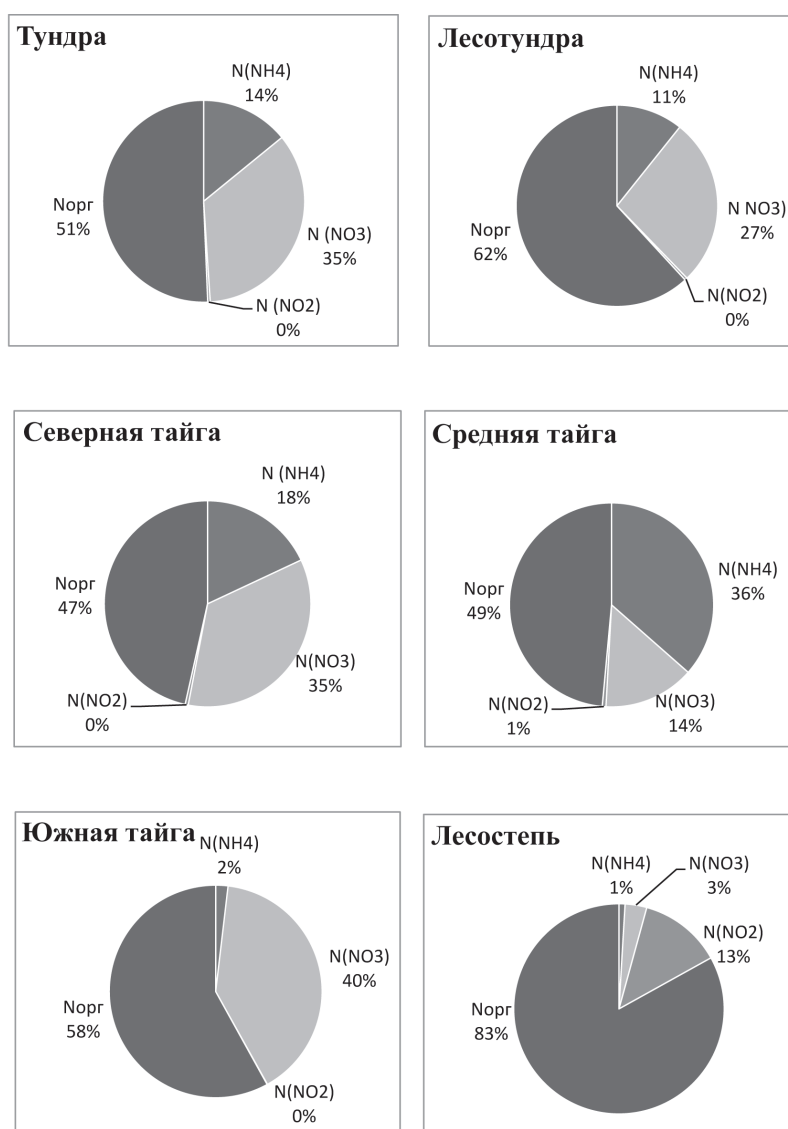


Рис. 4. Относительное содержание азота в различных формах в водах озер природных зон ЗС

В природных зонах диапазона ЮШ (южная тайга, лесостепь) процесс гумификации лимитируется практически полным истощением аммония.

Заключение. Исследование содержания нефтяных углеводов в водах озер, удаленных от источников загрязнения, показало низкое остаточное содержание нефтепродуктов для всех природных зон Западной Сибири. Установлено, что в силу специфики антропогенных загрязнений озер ЗС возможна совместная биохимическая трансформация нефтяных углеводов и нитратов с образованием гумусовых веществ, элементный состав которых соответствует

природным. Отмечается, что природно-климатические условия северных природных зон благоприятны для процесса гумификации, а южных природных зон — для процесса минерализации органических веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оборин А.А., Хмурчик В.Т., Илларионов С.А., Макарова М.Ю., Назаров А.В. Нефтезагрязненные биоценозы. Пермь: УрО РАН; Перм. гос. ун-т; Перм. гос. техн. ун-т, 2008. 511 с.
2. Васильев А.А., Матвеев Н.И., Лукиных В.Б. Экологические технологии нефтедобывающих компаний Западной Сибири // ЭКиП: Экология и промышленность России. 2004. № 5. С. 16-17.
3. Абросимов А.А. Экология переработки углеводородных систем. М.: Химия, 2002. 608 с.
4. Голдовская Л.Ф. Химия окружающей среды. М.: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 295 с.
5. Моисеенко Т.И., Паничева Л.П., Ларин С.И., Пологрудова О.А., Волкова Л.А. Методы исследования химического состава вод малых озер с целью выявления региональных особенностей его формирования // Вестник ТюмГУ. 2010. № 7. С. 175-190.
6. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Формирование химического состава вод озер в условиях изменений окружающей среды. М.: Наука, 2010. 268 с.
7. Кудрявцев А.А., Знаменщиков А.Н., Волкова С.С., Паничева Л.П. Модельная смесь углеводородов для ИК-спектрофотометрии и флуориметрии нефтепродуктов // Вестник ТюмГУ. 2011. № 5. С. 63-70.
8. Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. Москва: Физматлит, 2005. 576 с.
9. Коронелли Т.В., Дермичева С.Г., Ильинский В.В. и др. Видовая структура углеводородокисляющих бактериоценозов водных экосистем разных климатических зон // Микробиология. 1994. Т. 63. № 5. С. 917-922.
10. Ильинский В.В. Гетеротрофный бактериопланктон: Экология и роль в процессах естественного очищения среды от нефтяных загрязнений. Дисс. ... д-ра хим. наук. М., 2000. 603 с.
11. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения. Утверждены приказом Росрыболовства от 18.01.2010. № 20.
12. Орлов Д.С., Аммосова Я.М. Методы контроля почв, загрязненных нефтепродуктами // Почвенно-экологический мониторинг. М.: МГУ, 1994. С. 219-231.
13. Лысак В.В. Микробиология. Минск: БГУ, 2007. 426 с.
14. Современная микробиология. Прокариоты: В 2-х тт. Пер. с англ. / Под ред. Й. Ленглера, Г. Дрекса, Г. Шлегеля. М.: Мир, 2005.
15. Швец В.М. Органические вещества подземных вод как нефтепоисковые показатели // Органические вещества и микрофлора подземных вод и их нефтепоисковое значение: Тр. ВСЕГИНГЕО. Вып. 26. М., 1970. С. 6-29.
16. Перминова И.В. Анализ, классификация и прогноз свойств гуминовых кислот. Дисс. ... д-ра хим. наук. М., 2000. 359 с.
17. Одинцова Т.А. Эколого-геохимические аспекты трансформации органического вещества нефтезагрязненных геосистем // Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов. Сб. докладов. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2003. С. 241-245.
18. Илларионов С.А. Трансформация углеводородов нефти в почвах гумидной зоны. Дисс. ... д-ра биол. наук. Сыктывкар. 2006. 424 с.
19. Браунштейн А.Е. На путях к познанию реакций и ферментов переноса аминокислот: Доклад на пленарном заседании III Всесоюзного биохимического съезда. М., 1974. 37 с.
20. URL: <http://micro.moy.su/publ>.