

Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 3. (120). С. 101-121.  
Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. № 3. (120). P. 101-121.

## ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 574.22

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.007

### ВОДОРОСЛИ ПЕРИФИТОНА И БЕНТОСА КАК ИНДИКАТОРЫ СОСТОЯНИЯ ЗНАЧИТЕЛЬНО ИЗМЕНЁННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕРА САМОТЛОР

*Галина Владимировна Винокурова<sup>1</sup>, Владимир Викторович Кириллов<sup>1</sup>, Сергей Валерьевич Лушников<sup>2</sup>, Юлия Александровна Франк<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

<sup>2</sup>НТО «Приборсервис», Томск, Россия

<sup>3</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>1</sup>gvkim@mail.ru

<sup>1</sup>heller53@mail.ru

<sup>2</sup>pribor@mail.tomsknet.ru

<sup>3</sup>yulia.a.frank@gmail.ru

**Аннотация.** Среди водных объектов Западной Сибири, находящихся под воздействием нефтегазового комплекса, наибольшие изменения произошли на озере Сомотлор. Его экосистема значительно изменилась в результате уменьшения величины акватории и объема воды, разделения водоема дамбами на 13 участков и хронического, в течение более 50 лет, нефтяного загрязнения.

В альгоценозах эпифитона и бентоса оз. Сомотлор в сентябре 2007 г. из 179 видов и внутривидовых таксонов наиболее разнообразно были представлены зеленые, диатомовые водоросли и цианобактерии, семейства Scenedesmaceae, Selenastraceae, Radiococcaceae, Achnanthaceae, Microcystidaceae, Gomphosphaeriaceae и рода *Scenedesmus*, *Monoraphidium*, *Coelastrum*, *Xanthidium*, *Achnanthes*,

*Gloeocapsa*. Крайне незначительно представлены золотистые и желто-зеленые водоросли. Отличием от альгофлоры фоновых и мало нарушенных озер средней тайги является более высокое разнообразие хлорококковых по сравнению с десмидиевыми (зелеными) и хроококковых по сравнению с осцилляториевыми (цианобактериями). Наиболее благоприятные условия для вегетации водорослей сложились в центральных, изолированных от берега секторах. Менее благоприятными являются условия в секторах вдоль береговой линии, особенно у западного побережья. На грунтах с нефтяным загрязнением обилие и разнообразие водорослей выше, чем на грунтах без визуального нефтяного загрязнения. На основе сапробиологического анализа фитоперифитона и фитобентоса озера, низкого значения индекса сапробности озеро в сентябре 2007 г. характеризовалось как бетамезосапробное и мезотрофное, вода соответствовала 3-му классу удовлетворительной чистоты. Оценка экологического состояния озера по фитоперифитону и фитобентосу подтверждена гидрохимическими данными.

**Ключевые слова:** фитоперифитон, фитобентос, Самотлор, нефтепродукты, загрязнение поверхностных вод.

**Цитирование:** Винокурова Г.В., Кириллов В.В., Лушников С.В., Франк Ю.А. Водоросли перифитона и бентоса как индикаторы состояния значительно измененной экосистемы озера Самотлор // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (120). №3. С. 101-121. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.007

#### **Благодарность**

Исследования поддержаны проектом Госзадания ИВЭП СО РАН № 0306-2021-0001 при частичном финансировании Правительством Ямало-Ненецкого автономного округа (проект Западно-Сибирского научно-образовательного центра) и Российского центра освоения Арктики (Салехард, Россия).

Original article

## ALGAE OF PERIPHYTON AND BENTHOS AS INDICATORS OF THE STATE OF THE SIGNIFICANTLY ALTERED ECOSYSTEM OF LAKE SAMOTLOR

*Galina V. Vinokurova<sup>1</sup>, Vladimir V. Kirillov<sup>1</sup>, Sergey V. Lushnikov<sup>2</sup>, Yulia A. Frank<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia*

<sup>2</sup>*NTO "Priborservice", Tomsk, Russia*

<sup>3</sup>*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

<sup>1</sup>*gvkim@mail.ru*

<sup>1</sup>*heller53@mail.ru*

<sup>2</sup>*pribor@mail.tomsknet.ru*

<sup>3</sup>*yulia.a.frank@gmail.ru*

**Abstract.** Among the water bodies of Western Siberia that are under the influence of the oil and gas complex, the greatest changes occurred on Lake Samotlor. Its ecosystem has changed significantly as a result of a decrease in the size of the water area and the volume of water, the division of the reservoir by dams into 13 sections and chronic oil pollution for more than 50 years. In epiphyton and benthos algocenoses of Lake Samotlor in September 2007, out of 179 species and intraspecific taxa, Chlorophyta, Bacillariophyta, Cyanobacteria, families Scenedesmaceae, Selenastraceae, Radiococcaceae, Achnanthaceae, Microcystidaceae, Gomphosphaeriaceae and genera *Scenedesmus*, *Monoraphidium*, *Coelastrum*, *Xanthidium*, *Achnanthes*, *Gloeocapsa* were the most diverse represented. Chrysophyta and Xanthophyta are extremely slightly represented. The difference from the algaeflora of background and little disturbed lakes of the middle taiga is the higher variety of chlorococcal compared to desmidium (green) and chronococcal compared to oscillatory (cyanobacteria). The most favorable conditions for the growing of algae were in the central sectors isolated from the coast. Less favorable are conditions in sectors along the coastline, especially off the west coast. On soils with oil pollution, the abundance and diversity of algae is higher than on soils without visual oil pollution. Based on the saprobiological analysis of phytoperiphitone and phytobenthos of the lake, the low value

of the saprobicity index, the lake in September 2007 was characterized as betamesosaprotic and mesotrophic, water corresponded to class 3 – satisfactory purity. Assessment of the ecological state of the lake by phytoplankton and phytobenthos is confirmed by hydrochemical data.

**Keywords:** phytoplankton, phytobenthos, Samotlor, petroleum products, hydrocarbons, contamination of surface water.

**Citation:** G.V. Vinokurova, V.V. Kirillov, Tomsk. Algae of periphyton and benthos as indicators of the state of the significantly altered ecosystem of Lake Samotlor // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (120). № 3. P. 101-121. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.007

### **Gratitude**

The study is supported by project of the State Research Program IWEP SB RAS No. 0306-2021-0001 and was partly funded by the Yamalo-Nenets Autonomous District Government (West-Siberian Interregional Science and Education Center's project) and the Russian Center for Arctic Development (Salekhard, Russia).

### **Введение**

Проблема загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами – одна из актуальных и широко обсуждаемых. Нефтяному загрязнению подвержены сотни озер Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов. Нефть в воде претерпевает значительные физико-химические изменения и встречается в разных фракциях (растворенные углеводороды, водные экстракты, эмульсии и т.д.), которые определяют ее вместе как нефтепродукты [1, 2, 3, 4, 5].

Проследить трансформацию каждой озерной экосистемы под антропогенным прессом долговременного, хронического нефтяного загрязнения не представляется возможным. Но ряд общих для озер этих регионов «эволюционных» процессов, в частности трансформацию альгоценозов, можно проследить на примере озера Самотлор. Индикаторная значимость водорослей твердых субстратов общепризнанна [6]. Кроме того, высокий уровень метаболизма водорослей [7] определяет существенную роль фитобентоса и фитоперифитона в трансформации вещества и энергии в водных экосистемах.

Озеро Самотлор, расположенное в центральной части Западно-Сибирской равнины (61°7'4"N, 76°45'32"E) на водоразделе рек Вах и Ватинский Еган, является примером водоема, экосистема которого значительно изменилась за более чем 50-летний период интенсивного и непрерывного

использования человеком. В 1968 г. по сбросному каналу из озера была спущена вода в р. Люк-Колен-Ёган. Суммарная площадь водного зеркала уменьшилась с 61.1 до 46.7 км<sup>2</sup>, максимальная глубина – с 3,0 до 1,9 м. Единый ранее водоем разделен дамбами на 13 отдельных акваторий площадью 0.33–9.19 км<sup>2</sup>. Берега представлены преимущественно искусственными песчаными насыпями, естественная береговая линия сохранилась только приблизительно на 30% длины общей береговой линии озера [8, 9, 10, 11, 12, 13].

На водосборном бассейне озера, находящегося в подзоне средней тайги, не осталось леса, и сейчас он представляет собой безлесную плоскую, пониженную, сильно заболоченную территорию с абсолютными отметками 35–80 м [14].

Изменился химический состав воды. До начала нефтедобычи озеро характеризовалось как водоём с низкой минерализацией, повышенным содержанием растворённых органических веществ и пониженными значениями рН, хорошо аэрировалось по всей водной толще, но летом на глубине из-за окисления жидкого торфогрунта наблюдался дефицит кислорода. В результате загрязнения нефтепродуктами, сточными и подсланевыми водами произошел сдвиг в солевом режиме, содержание хлоридов в воде увеличилось более чем в 2 раза, как и в большинстве водных объектов, эксплуатирующихся более 5 лет. Произошло изменение донных отложений. На многих участках ил, песок, дресва даже визуально загрязнены нефтью [12, 13, 15, 16, 17].

Незначительно изменились лишь климатические условия и характер питания озера, которое осуществляется за счет талых вод и атмосферных осадков. Существенна ветроволновая нагрузка: за год наблюдается всего 36 безветренных дней. В период открытой воды господствуют ветры северного и северо-западного направления со средней скоростью 3.6 м/с [14].

Все это не могло не привести к нарушению естественного режима озера и трансформации водной экосистемы. В 1968–1972 гг. водная растительность на дне озера отсутствовала, зарастания не наблюдалось. Сейчас же степень зарастания озера макрофитами достигает 70%.

Проследить трансформацию альгофлоры перифитона и бентоса оз. Самотлор в процессе трансформации самого озера не представляется возможным, поскольку данное исследование, проведенное в сентябре 2007 г., являлось первым. Однако опубликованные в 2016 г. (по сборам 2011 г.) [18] материалы о фитопланктоне и фитобентосе озер Самотлор и Вильент позволили проследить последующую после 2007 г. динамику структуры альгосообществ оз. Самотлор.

Цель данной работы – изучить структуру альгосообществ на основных субстратах (песок и поверхность макрофитов) на разных участках озера, проследить ее взаимосвязь с гидрохимическими показателями и оценить

экологическое состояние озера по показателям фитоперифитона и фитобентоса.

Результаты, полученные в 2007 г., могут в дальнейшем представлять интерес для мониторинга состояния озера и прогнозирования эволюции его экосистемы.

### *Объекты и методы исследования*

Пробы перифитона (на листьях и стеблях тростника, рогоза, осоки, стрелолиста, рдеста) и бентоса (заиленный песок) отобраны в сентябре 2007 г. в 11 секторах озера (см. рис. 1) на глубине 0.20–1.35 м стандартными гидробиологическими методами [6].

Таксономическую принадлежность водорослей устанавливали под световым микроскопом ( $\times 650$  раз) с использованием отечественных «Определителей пресноводных водорослей СССР».



Рис. 1. Схема расположения оз. Самотлор и деления его на секторы

Подсчет клеток водорослей проводили в камере Нажотта. В доминирующий комплекс включены виды с численностью  $\geq 10\%$  от общей численности. Частоту встречаемости вида оценивали как отношение числа проб, в которых он присутствовал, к общему числу проб, частоту доминирования вида – как отношение числа проб, в которых данный вид доминировал, к общему числу проб. Для анализа структуры сообществ использовали индекс видового разнообразия Шеннона.

Для определения экологической и географической характеристики водорослей использованы сведения из работы С.С. Бариновой и др. [19]. Доля водорослей-индикаторов оценена относительно полного списка водорослей. Качество воды приведено в соответствии с Комплексной эко-

логической классификацией качества поверхностных вод суши [20].

Химико-аналитические работы выполнялись в аккредитованных лабораториях Экологического аналитического центра дочернего ЗАО «НижневартовскНИПИнефть» и Экоаналитического комплекса ЗАО «Региональный Аналитический Центр Механобр инжиниринг аналит» по стандартным методикам анализа пресных вод согласно действовавшему на момент проведения работ РД 52.18.595-96.

На основании гипотезы, что основное загрязнение озера идет со стороны берега в процессе дренирования и смыва, выбрана схема анализа данных по секторам, граничащим с берегом (береговые), и секторам, не имеющим связи с берегом (центральные).

### Результаты

**Гидрохимическая характеристика.** Прозрачность воды озера в период исследования варьировала от 0.25 до 1.20 м по диску Секки, температура — от 5.2 до 13.6 °С, содержание растворенного кислорода — от 8.64 до 11.20 мг/дм<sup>3</sup>.

Центральные сектора оз. Самотлор были менее минерализованы, чем береговые, значения рН отличались незначительно (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав воды разных участков оз. Самотлор, сентябрь 2007 г. (над чертой — пределы, под чертой — среднее со стандартной ошибкой)

Показатель	Участок озера		ПДК <sub>кв</sub>
	граничащие с берегом	центральные	
Общая минерализация, мг/л	$\frac{57.4-171.0}{105.67 \pm 10.51}$	$\frac{92.40-97.20}{94.80 \pm 2.40}$	1000
рН	$\frac{6.90-8.50}{7.42 \pm 0.10}$	$\frac{7.10-7.80}{7.34 \pm 0.12}$	6.5–8.5
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/л	$\frac{0.05-0.17}{0.10 \pm 0.01}$	$\frac{0.05-0.09}{0.06 \pm 0.01}$	0.05
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/л	$\frac{0.09-0.40}{0.22 \pm 0.03}$	$\frac{0.20-0.45}{0.35 \pm 0.05}$	0.5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	$\frac{0.10-0.51}{0.30 \pm 0.05}$	$\frac{0.26-0.67}{0.52 \pm 0.08}$	40
БПК <sub>5</sub> , мг O/дм <sup>3</sup>	$\frac{1.28-6.72}{3.15 \pm 0.39}$	$\frac{1.60-6.72}{3.67 \pm 0.85}$	2.1
ПО, мг O/дм <sup>3</sup>	$\frac{7.93-12.63}{10.11 \pm 0.27}$	$\frac{7.93-11.70}{9.94 \pm 0.85}$	5–7
Ni, мг/л	$\frac{0.04-0.12}{0.06 \pm 0.01}$	$\frac{0.048-0.049}{0.05 \pm 0.001}$	0.01

Продолжение таблицы 1

Показатель	Участок озера		ПДК <sub>вр</sub>
	границащие с берегом	центральные	
Fe, мг/л	0.28–1.40 0.83±0.14	0.66–1.30 0.98±0.32	0.1
Zn, мг/л	0.01–1.06 0.03±0.02	0.01–0.03 0.02±0.01	0.01
Нефтепродукты, мг/л	0.02–0.14 0.06±0.01	0.03–0.13 0.07±0.02	0.05 мг/л

Содержание фосфат-иона в береговых секторах превышало его содержание в центральных секторах, азота в разных его формах, напротив, было больше в центральной части. В отличие от фосфат-ионов, содержание азота не превышало ПДК<sub>вр</sub>. Легкоокисляемой органики (по БПК<sub>5</sub>) больше в центральной части, трудноокисляемой органики (по ПО) больше в береговых секторах. Средние значения БПК<sub>5</sub> и ПО превышали ПДК<sub>вр</sub> в 1.4–1.7 раза. Содержание Fe, Ni, Zn в секторах, имеющих связь с берегом и изолированных от берега, отличалось мало, и эти значения в 2–10 раз выше ПДК<sub>вр</sub>.

На момент исследования в сентябре 2007 г. содержание нефтепродуктов в воде озера в среднем по секторам, границащим с берегом, составляло  $0,06 \pm 0,01$  мг/л, в центральных секторах  $-0,07 \pm 0,02$  мг/л. Это ненамного превышает ПДК<sub>вр</sub> – 0,05 мг/л, хотя на озере не прекращалась добыча нефти. Концентрация нефтепродуктов в донных отложениях на большей части акватории озера не превышала 5 г/кг (рис. 2).

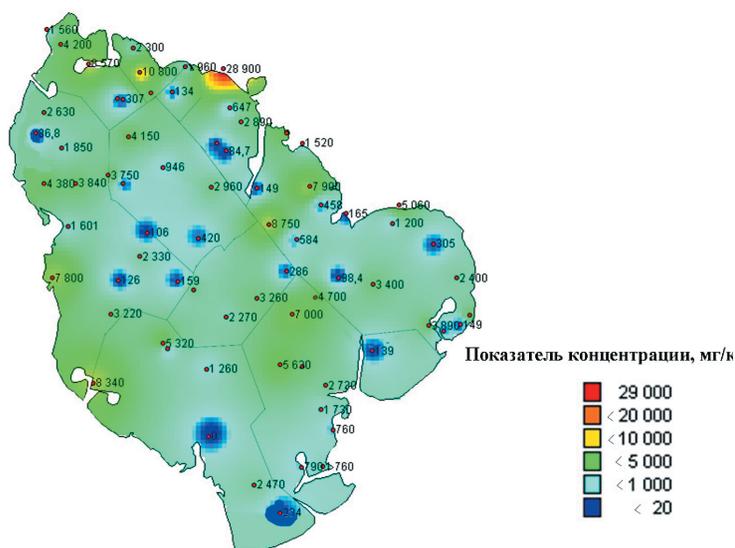


Рис. 2. Схема пространственного распределения концентрации нефтепродуктов в донных отложениях на различных участках озера Самотлор в сентябре 2007 г.

**Состав и обилие водорослей.** Из выявленных в сентябре 2007 г. 179 видов и разновидностей водорослей наиболее разнообразно представлены зеленые, диатомовые водоросли и цианобактерии, семейства Scenedesmaceae, Selenastraceae, Radiococcaceae, Achnanthaceae, Microcystidaceae, Gomphosphaeriaceae и рода *Scenedesmus*, *Monoraphidium*, *Coelastrum*, *Xanthidium*, *Gloeocapsa*, *Achnanthes*. Крайне незначительно представлены золотистые и желто-зеленые водоросли. Отмечена асимметричность структуры альгофлоры перифитона и бентоса: преобладают одно- и двухвидовые семейства и рода, одно-, трехвидовые доминирующие комплексы [21].

Видовое разнообразие водорослей в центральных секторах выше такового в береговых секторах (см. табл. 2). Поскольку наиболее часто встречались только 9 видов (*Scenedesmus quadricauda* Chod. (частота встречаемости 81,8%), *Dictyosphaerium pulchellum* Wood. и *Achnanthes minutissima* Kütz. (по 72,7%), *Gloeocapsa magma* (Bréb.) Kütz. emend. Hollerb., *Navicula dicephala* (Ehrb.) W.Sm., *Nitzschia sublinearis* Hust., *Cymbella ventricosa* Kütz. (по 63,6%), *Cosmarium subprotumidum* Nordst. (54,5%), *Tetraedron minimum* (A.Br.) Hansg. (45,5%)), а частота встречаемости остальных видов менее 10%, то сходство альгофлоры секторов очень низкое: при 50% уровне значимости общие виды отмечены только в секторах XI, VI, X, III. Альгофлора последних трех секторов (береговых) носит подчиненный характер по отношению к альгофлоре центрального XI сектора.

Доминирующие комплексы как по численности, так и по биомассе состояли в большинстве случаев (75,0%) из 1–3 видов. Высокая частота доминирования по численности отмечена для *Scenedesmus quadricauda* (29,2%), *S. spinosus* Chod. (20,8%), *A. minutissima* и *D. pulchellum* (по 16,7%), по биомассе – для *C. subprotumidum* (25,0%), *Pediastrum duplex* Meyen (16,7%).

Численность, биомасса водорослей, число видов и величина индекса Шеннона в секторах значительно варьируют (см. табл. 2). Вместе с тем, среднее значение численности (по всем субстратам) в центральных секторах ( $1884.9 \pm 671.3$  млн кл./м<sup>2</sup>) выше, чем в секторах, примыкающих к берегу ( $386.3 \pm 146.2$  млн кл./м<sup>2</sup>). Средняя биомасса, напротив, в центральных секторах ниже (1.7 г/м<sup>2</sup>), чем в примыкающих к берегу (6.4 г/м<sup>2</sup>). Это связано с тем, что в центральных секторах преобладают одноклеточные водоросли, а в прибрежных секторах – нитчатые зеленые водоросли из родов *Spirogira*, *Oedogonium*, *Mougeotia* и нитчатые цианобактерии родов *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Phormidium*, *Calothrix*, *Rivularia*, *Tolypothrix*, *Lyngbya*, *Aphanizomenon*.

Анализ структурных показателей сообществ на субстратах разного типа позволил выявить следующие особенности:

– на песчаном грунте у берега число видов ( $24 \pm 4$ ) и численность ( $827.4 \pm 312.4$  млн кл./м<sup>2</sup>) ниже, чем на песчаном грунте в центральных секторах ( $28 \pm 2$  и  $2350.8 \pm 623.8$  млн кл./м<sup>2</sup>). Биомасса же на песчаном

грунте у берега ( $11.5 \pm 5,5$  г/м<sup>2</sup>), напротив, выше на порядок биомассы на песках в центральной части ( $1.69 \pm 0.7$  г/м<sup>2</sup>);

– более высокое значение индекса Шеннона в центральных секторах ( $3.23 \pm 0.32$  бит/экз.) по сравнению с береговыми ( $2.67 \pm 0.25$  бит/экз.) свидетельствует о более благоприятных здесь условиях для развития водорослей по сравнению с участками, примыкающими к берегу;

– видовое разнообразие, численность и индекс Шеннона на песчаном грунте с нефтяными пятнами в среднем выше, чем на песке без видимого нефтяного загрязнения (табл. 3);

– на макрофитах число видов и обилие в береговых и центральных секторах примерно одинаково;

– разнообразие и обилие водорослей на макрофитах меньше, чем на рыхлом заилено-песчаном грунте.

Таблица 2. Структура фитоперифитона и фитобентоса на разных участках оз. Самотлор, сентябрь 2007 г. (над чертой – пределы, под чертой – среднее со стандартной ошибкой)

Показатель	Участок озера	
	граница с берегом	центральные
Численность, млн кл./м <sup>2</sup>	$\frac{8.5-2231.6}{386.3 \pm 146.2}$	$\frac{21.5-3546.5}{1884.9 \pm 671.5}$
Биомасса, г/м <sup>2</sup>	$\frac{0.01-50.4}{6.4 \pm 3.2}$	$\frac{0.1-4.2}{1.7 \pm 0.8}$
Число видов	$\frac{3-33}{17 \pm 2}$	$\frac{14-32}{25 \pm 3}$
Индекс Шеннона, бит/экз.	$\frac{0.82-4.11}{2.67 \pm 0.25}$	$\frac{2.57-4.37}{3.23 \pm 0.32}$
Индекс сапробности	$\frac{1.42-2.39}{1.88 \pm 0.06}$	$\frac{1.81-2.57}{2.17 \pm 0.13}$

Таблица 3. Структура альгоценозов оз. Самотлор на разном субстрате, сентябрь 2007 г. (над чертой – пределы, под чертой – среднее со стандартной ошибкой)

Показатель	Заиленный песок с нефтяным загрязнением	Заиленный песок без нефтяного загрязнения	Макрофиты
Численность, млн кл./м <sup>2</sup>	$\frac{131.7-3546.3}{1543.9 \pm 627.2}$	$\frac{36.2-2837.6}{1245.9 \pm 467.9}$	$\frac{8.5-525.9}{98.6 \pm 41.2}$
Биомасса, г/м <sup>2</sup>	$\frac{0.3-24.4}{5.7 \pm 4.7}$	$\frac{0.1-31.9}{8.1 \pm 4.9}$	$\frac{0.01-50.4}{4.1 \pm 3.9}$
Число видов	$\frac{18-33}{26 \pm 2}$	$\frac{13-31}{22 \pm 5}$	$\frac{3-22}{14 \pm 2}$

Продолжение таблицы 3

Показатель	Заиленный песок с нефтяным загрязнением	Заиленный песок без нефтяного загрязнения	Макрофиты
Индекс Шеннона (по численности), бит/экз.	2.84–3.79 3.17±0.19	1.53–4.37 3.05±0.44	0.07–4.11 2.29±0.39
Индекс сапробности	1.81–2.37 2.00±0.10	1.58–2.39 1.91±0.13	1.42–2.57 1.94±0.09

**Эколого-географическая характеристика и оценка качества воды.** Из таксонов с известной географической характеристикой в донных и эпифитных альгоценозах преобладали космополитные формы – 46,4%. Аркто-альпийские формы составляли 2,2%, бореальные – 10,6%.

Спектр галобности отражает низкую минерализацию воды озера: доля олигогалобов (индифферентов – 36.9%, галофилов – 5.0%, галофобов – 2.8%) существенно превышала долю мезогалобов – 4.5%. Последние встречались в береговых секторах у западного берега.

Среди индикаторов pH преобладали индифференты – 16.2%. Превышение доли алкалифилов+алкалибионтов (11.7%) над ацидофилами (3.4%) является отражением слабощелочной реакции среды.

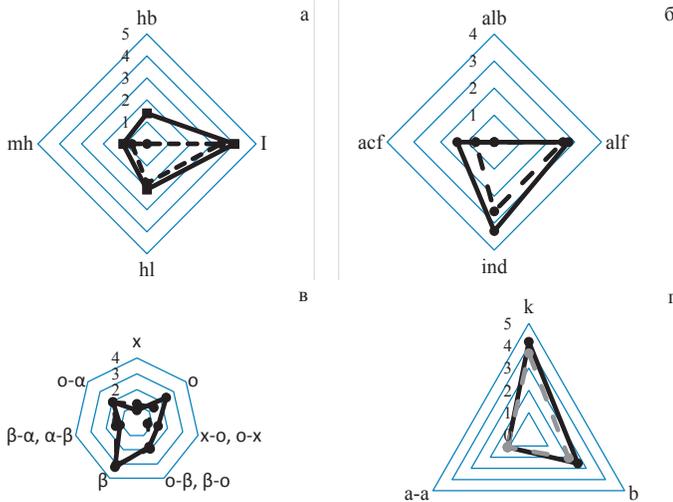


Рис. 3. Экологический спектр фитоперифитона и фитобентоса оз. Сомотлор, сентябрь 2007 г.

Примечание: а – отношение к минерализации (i – индифференты, hl – галофилы, hb – галофобы, mh – мезогалобы); б – отношение к pH (i – индифференты, alf – алкалифилы, alb – алкалибионты, acf – ацидофилы); в – отношение к содержанию органических веществ (x – ксено-, o – олигосапробионты, β – бета-, α – альфамезосапробионты). Данные представлены в относительном выражении (как ln числа таксонов). Сплошная линия – секторы, имеющие связь с берегом, прерывистая линия – центральные секторы, не имеющие связи с берегом.

Из всего списка водорослей характеристика по отношению к органическому загрязнению известна только для 41.0% форм. Большая часть из них (37.4%) – обитатели чистых вод (ксеносапробионты, олиго-бетамезосапробионты). Характеристика сапробности водорослей-доминантов варьировала от олиго-ксеносапробионтов до альфа-бетамезосапробионтов, но преобладали бетамезосапробионты.

Экологические спектры альгосообществ центральной и прибрежной зоны отличались незначительно (рис. 3) за исключением того, что в прибрежной зоне больше доля индикаторов органического загрязнения.

Оцененная по структурным и количественным показателям фитоперифитона и фитобентоса вода озера соответствует 3-му классу – удовлетворительной чистоты. Примечательно, что по видам-индикаторам и индексу сапробности наибольшее содержание органических веществ выявлено в центральных участках озера. А именно в центральных секторах по сравнению с береговыми секторами выше содержание соединений азота и величина БПК<sub>5</sub> (легкоокисляемая органика) (см. табл. 1).

### *Обсуждение*

В сентябре 2007 г. значение многих гидрохимических показателей (фосфора в виде фосфат-ионов, легко- и трудноокисляемой органики, нефтепродуктов, тяжелых металлов (Fe, Ni, Zn)) превышало ПДК<sub>вр</sub>. Из них в береговых секторах по сравнению с центральными было больше фосфора и трудноокисляемой органики. Примерно одинаково в береговых и центральных секторах было содержание нефтепродуктов и тяжелых металлов. Легкоокисляемой органики было больше в центре. Следует отметить, что высокая концентрация Fe является природной характеристикой озер этого региона.

Не превышало значение ПДК<sub>вр</sub> содержание аммиачного и нитратного азота, общая минерализация и рН. Из них азота было больше в центре, минерализация выше у берега, мало отличались значения рН.

Общая минерализация воды оз. Самотлор не превышала фоновую (в озерах средней тайги, не подвергающихся антропогенному воздействию 100–150 мг/л [1, 17]), хотя в качественном отношении произошел сдвиг в сторону повышения содержания ионов Cl– до 25.1–52.6 мг/л в результате применяемой на озере технологии добычи нефти. Активная реакция среды сдвинулась из кислой (5.0–6.0 [17]) в щелочную.

Из альгологических показателей число видов, индекс видового разнообразия, индекс сапробности, численность (мелкие одноклеточные водоросли) в центральных секторах были больше по сравнению с береговыми. Кроме того, эти показатели на песке с видимыми нефтяными пятнами превышали таковые на песке без визуального нефтяного загрязнения.

По сравнению с фоновыми и незначительно нарушенными водоемами среднетаежной подзоны Сибири в фитоперифитоне и фитобентосе Самогтора произошли изменения: менее представлены нитчатые формы водорослей и крупные одноклеточные водоросли, крайне незначительны золотистые и желто-зеленые водоросли. Таксономическое разнообразие десмидиевых, в частности, рода *Cosmarium*, характерное для северной альгофлоры, отмечено и в Самогторе. Но для альгофлоры перифитона и бентоса озера более характерны семейства и роды, представители которых являются мелкими одноклеточными формами из семейств *Scenedesmaceae*, *Selenastraceae*, *Radiococcaceae*, *Achnanthaceae*, *Microcystidaceae*, *Gomphosphaeriaceae* и родов *Scenedesmus*, *Monoraphidium*, *Coelastrum*, *Xanthidium*, *Gloeocapsa*, *Achnanthes*. Наиболее часто встречались *Scenedesmus quadricauda*, *Dictyosphaerium pulchellum*, *Achnanthes minutissima*, *Gloeocapsa magma*, *Navicula dicephala*, *Nitzschia sublinearis*, *Cymbella ventricosa*, *Cosmarium subprotumidum*, *Tetraedron minimum*. Доминировали по численности в альгоценозах также мелкие одноклеточные водоросли *S. quadricauda*, *S. spinosus*, *D. pulchellum*, *A. minutissima*. Это не характерно для ведущих таксономических групп в фоновых и незначительно нарушенных водоемах, представители которых, как правило, имеют либо крупные размеры, либо являются нитчатыми формами. [21].

При отмеченных в таксономической структуре отличиях от фоновых и мало подверженных антропогенной нагрузке озер средней тайги, соотношение эколого-географических и сапробиологических групп водорослей было практически неизменным [21]. Среди географических групп преобладали космополиты, что свойственно для всей циркумбореальной области. Бореальные и аркто-альпийские виды немногочисленны. По отношению к галобности во всех озерах преобладали олигогалобы, обитающие в водах со слабой минерализацией. Мезагалобы хоть и встречаются во всех озерах, но их доля крайне незначительна. По отношению к водородному показателю во всех озерах велика доля индифферентов, распространены алкалифилы, что характеризует воду как нейтральную и слабощелочную.

Среди сапробиологических групп в озерах средней тайги, в том числе оз. Самогтор, преобладают  $\beta$ -мезосапробионты. Немного уступают ей по количеству таксонов олигосапробионты. Многочисленна группа  $\alpha$ - $\beta$ -мезосапробионтов. Присутствуют в среднетаежных озерах как водоросли-индикаторы чистых вод ( $\chi$ ,  $\chi$ - $\alpha$ ,  $\alpha$ - $\chi$ ,  $\alpha$ -сапробионты), так и индикаторы сильно загрязненных органикой водоемов ( $\beta$ - $\alpha$ ,  $\alpha$ - $\beta$ ,  $\beta$ - $\rho$ ,  $\alpha$ - $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\rho$ -сапробы), причем соотношение этих групп незначительно отличается в озерах с разной степенью антропогенной нагрузки. Присутствие  $\alpha$ - $\rho$ - и  $\rho$ -сапробных видов, связанное с естественными природными процессами (интенсивно идущими процессами минерализации нестойких органических соединений), наблюдается в летний период во многих озерах Центральной Якутии [22].

В более поздний период исследования в июне 2011 г. в альгофлоре (фитоперифитон, фитобентос и фитопланктон) озер Самотлор и Вильент [18] так же, как и в сентябре 2007 г., отмечено невысокое таксономическое разнообразие (67 видов и в.в.т. из 4 отделов), преобладание зеленых и диатомовых водорослей, асимметричность альгофлоры, наибольшее таксономическое разнообразие в семействах Scenedesmaceae, Desmidiaceae, Closteriaceae. Эколого-географический анализ водорослей также показал преобладание широко распространенных, олигогалобных и индифферентных по отношению к активной реакции среды видов.

Полученные результаты (трансформация структуры альгосообществ в сторону мелких одноклеточных водорослей, повышение видового разнообразия и численности при загрязнении нефтепродуктами, неизменность эколого-географических и сапробиологических спектров при длительном нефтяном загрязнении) можно объяснить исходя из предположений: 1) озеро обладает значительным потенциалом самоочищения от нефтепродуктов; 2) в незначительном количестве нефтепродукты и соединения, образующиеся в процессе их трансформации, оказывают стимулирующее действие на развитие водорослей перифитона и бентоса. Выделенные из литературных источников причины данных процессов могут быть характерны и для других озерных экосистем Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов.

Рассмотрим возможные причины. На момент исследования содержание нефтепродуктов в воде оз. Самотлор ненамного превышало ПДК<sub>вр</sub> – 0,05 мг/л, хотя на озере более полувека не прекращалась добыча нефти и существуют всевозможные вторичные источники загрязнения ее компонентами. В озерах нефтегазодобычи изначально сформировались микробиомы (сообщества бактерий, водных грибов, водорослей), не только адаптированные к повышенной концентрации, но и способные перерабатывать нефтепродукты. Одноклеточные водоросли обладают врожденной или приобретенной способностью включаться в цикл переработки нефтепродуктов. Такое свойство проявляют представители хлорококковых зеленых водорослей [1, 2, 3, 23, 24, 25, 26], а именно они преобладают по разнообразию и обилию в оз. Самотлор.

Немаловажным является тот факт, что сама нефть содержит «родные» многокомпонентные микробные сообщества. Микробиомы были захоронены одновременно с растительными остатками, долгое время перерабатывали их, находясь под толстым слоем перекрываемых пород. Микробная трофическая цепь в нефтяных пластах основывается на биодеградации нефти, ускоряющейся при поступлении кислорода [24, 27, 28, 29]. Соответственно, нефть поступает в оз. Самотлор со своим набором микроорганизмов, в том числе нефтеокисляющих, которые интенсивно включаются в процесс ее биодеградации при наличии кислорода в тол-

ще воды. К этому процессу подключаются эволюционно сложившиеся в озере комплексы микроорганизмов, в состав которых входят и водоросли перифитона и бентоса.

К элементам природного потенциала самоочищения озер нефтегазодобычи относятся особенности морфологических и гидрофизических характеристик. Они мелководные, хорошо прогреваемые в летнее время. Соответственно, активность вегетирования микроорганизмов (бактерий, дрожжевых грибов, мицелиарных грибов, водорослей) высока, и происходит биodeградация углеводов. Повышенная регистрация соединений азота вполне возможно имеет бактериальное происхождение. Высокие значения аммиачного и нитратного азота выявлены в донных отложениях фоновых озер Нижневартовского региона [24]. Соответственно, в центральных секторах мелкого и хорошо прогреваемого оз. Самотлор при высокой численности одноклеточных водорослей наблюдается повышенное содержание аммиачного и нитратного азота как результат биodeградации нефтепродуктов.

В отличие от одноклеточных водорослей нитчатые водоросли обладают способностью к высокому и избыточному накоплению элементов [30, 31]. В береговых секторах оз. Самотлор преобладают именно нитчатые зеленые и сине-зеленые водоросли, которые, возможно, не столько перерабатывают нефтепродукты, сколько накапливают их в своих клетках, поэтому соединений азота биогенного происхождения здесь меньше, чем в центральных секторах.

Следовательно, в оз. Самотлор наблюдаются два типа биоремедиации — переработка нефтепродуктов одноклеточными водорослями (в центральных секторах) и накопление их в клетках нитчатых водорослей (в береговых секторах).

Альгобактериальные ассоциации, обладая разными ферментными системами, при совместном действии способны полнее и быстрее разлагать углеводородные субстраты. Синергетическая эффективность при разложении нефтяных углеводородов бактериальными, дрожжевыми клетками уже установлена [32].

Также к элементам природного потенциала самоочищения озер нефтегазодобычи относятся постоянные ветры (всего 36 безветренных дней в году [14]), благодаря которым происходит перемешивание водной толщи мелководного оз. Самотлор, насыщение ее кислородом и, как следствие, — ускорение окисления нефтепродуктов.

Помимо эволюционно сложившегося высокого потенциала самоочищения оз. Самотлор, как и других озер этого региона, от нефтепродуктов существует приобретенный потенциал. Повышению (приобретению) потенциала самоочищения, во-первых, способствует отсыпка песком берегов и основания дамб. С течением времени песок заиливается, а этот

субстрат является оптимальным для углеводородокисляющих бактерий. Причем их высокая активность сохраняется в пределах 5–25 °С [24].

Углеводородокисляющие микробобиомы, адаптированные к местным условиям и изначально присутствующие в фоновых водоемах, активизируются при вбросе нефтепродуктов в водную экосистему при их добыче и/или утечке при антропогенной переработке [24, 33]. Перерабатывая нефтепродукты, углеводородокисляющие бактерии и грибы, в свою очередь являются поставщиками легкоусвояемых биогенов, которые используют в своем метаболизме микроводоросли. Неслучайно в нашем исследовании обилие и разнообразие мелкоклеточных водорослей на загрязненных нефтью заиленных песках значительно выше, чем на чистых песках.

Кроме того, стимуляция роста может быть связана со способностью водорослей утилизировать нефть как источник органических веществ. Угнетающее влияние на водоросли нефть оказывает в сыром состоянии и в больших концентрациях [34, 35, 36, 37].

Таким образом, загрязнение оз. Самотлор нефтепродуктами происходит, но также происходит самоочищение от них и, возможно, интенсивное самоочищение, причем преобладает загрязнение нефтепродуктами со стороны берега, т.е. в результате деятельности человека при транспортировке и переработке добытой нефти.

Фосфора в воде береговых секторов содержится больше, чем в центральных, возможно, потому что нефть и продукты ее переработки поступают в озеро со стороны берега, а его в нефти содержится до 10% [38].

Несмотря на долгие годы эксплуатации оз. Самотлор сохранилась низкая минерализация, поскольку характер питания озера — низко минерализованные атмосферные осадки. В связи с этим, в альгоценозах преобладают виды — олигогалобы — индикаторы невысокой минерализации.

Сырая нефть содержит ряд тяжелых металлов (V, Ni, Fe, Al, Cu и т. д.) в следовых концентрациях [24], но содержание Fe, Ni, Zn в воде оз. Самотлор в 2–10 раз выше ПДКвр и мало отличается в секторах, имеющих связь с берегом и изолированных от берега. Их много и в донных отложениях. Возможно, за многие годы произошло накопление тяжелых металлов в озере при отсутствии возможности очищения от них. Поглощающие тяжелые металлы нитчатые водоросли являются временным фактором самоочищения воды озера — при отмирании они становятся вторичным источником загрязнения тяжелыми металлами. Таким образом, высокое содержание тяжелых металлов в озере имеет антропогенную причину. Но следует иметь в виду, что высокая концентрация Fe является природной характеристикой озер этого региона.

### *Выводы*

1. Несмотря на выявленную в сентябре 2007 г. перестройку структурно-функциональных характеристик альгоценозов перифитона и бентоса оз. Самотлор (по сравнению с фоновыми и мало нарушенными озерами средней тайги) в сторону мелких одноклеточных зеленых, сине-зеленых, диатомовых водорослей, эколого-географический и сапробиологический спектр не отличается от спектра альгофлоры фоновых озер. Учитывая общепризнанную индикаторную значимость водорослей твердого субстрата, можно говорить о незначительных изменениях общей минерализации, рН, содержании органических веществ и нефтепродуктов в воде озера Самотлор.

К причинам высокого естественного и приобретенного потенциала самоочищения озера (на основе экстраполяции литературных данных) можно отнести следующие факторы: наличие эволюционно сложившегося микробиома (бактерии, грибы, водоросли), не только устойчивого к нефтяному загрязнению, но и использующего нефтепродукты как источник питания; активация их жизнедеятельности в результате постоянного поступления нефтепродуктов, хорошей прогреваемости неглубокого озера, длительного светового периода; наличие благоприятного для развития водорослей субстрата (заиленного песка); постоянные ветры, приводящие к насыщению воды озера кислородом.

2. Наиболее благоприятные условия для вегетации водорослей сложились в центральных, изолированных от берега секторах. Менее благоприятными являются условия в секторах вдоль береговой линии. Особенно это относится к западному побережью (I и X сектора).

Индикационная оценка состояния озера по фитоперифитону и фитобентосу в сентябре 2007 г. не показала существенного загрязнения озера нефтепродуктами и органическими соединениями. На основе сапробиологического анализа фитоперифитона и фитобентоса озера, низкого значения индекса сапробности озеро в сентябре 2007 г. характеризовалось как бетамезосапробное и мезотрофное. Вода соответствовала 3-му классу удовлетворительной чистоты.

3. Выявленное повышенное содержание тяжелых металлов в воде озера можно объяснить их накоплением, тем не менее на вегетацию водорослей грунтов данные концентрации металлов не повлияли — абберрантных форм водорослей в бентосе и перифитоне не отмечено.

4. Оценка состояния озера по фитоперифитону и фитобентосу подтверждена гидрохимическими данными.

### *Заключение*

К 2007 г. экосистема озера, адаптировавшись к уменьшению величины акватории и объема воды, к разделению водоема на сектора и хроническому в течение 50 лет нефтяному загрязнению, вновь пришла в стабильное состояние, но уже на «другом уровне», при ином составе биоты. Возможно, это объясняется и тем, что нефтяные углеводороды не являются эволюционно инородными для микробиоценозов в районах с запасами нефти.

### *Список источников*

1. Бачурин Б.А. Идентификация нефтяной составляющей органического загрязнения гидросферы / Б.А. Бачурин // Водные ресурсы, геологическая среда и полезные ископаемые Южного Урала. – 2000. – С. 143-153.
2. El-Sheekh, M.M. Use of algae as indicators for environmental pollution / M.M. El-Sheekh // Egypt. J. Botany. – 1998. – № 38. – P. 169-188.
3. El-Sheekh M.M., El-Naggar A.H., Osman M.E.H., Haider A. Comparative studies on the green algae *Chlorella homosphaera* and *Chlorella vulgaris* with respect to oil pollution in the River Nile / M.M. El-Sheekh, A.H. El-Naggar, M.E.H. Osman, A. Haider // Water Air and Soil Pollution. – 2000. – № 124. – P. 187-204.
4. Перетрухина И.В., Ильинский В.В., Литвинова М.Ю. Определение скоростей биодеградации нефтяных углеводородов в воде литорали Кольского залива / И.В. Перетрухина, В.В. Ильинский, М.Ю. Литвинова // Вестник МГТУ. – 2006. – Т. 9. – № 5. – С. 828-832.
5. Eshagberi G.O. The Effects of Oil Pollution on the Environment / G.O. Eshagberi // The Nigerian Academic Forum. – 2012. – Vol. 23. – №. 1. – P. 1-8.
6. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В.А. Абакумова. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 318 с.
7. Сиренко Л.А. Биологически активные вещества водорослей и качество воды / Л.А. Сиренко, В.Н. Козицкая. – Киев: Наук. думка, 1988. 256 с.
8. О состоянии окружающей природной среды Ханты-Мансийского автономного округа в 1999 г. – Ханты-Мансийск: Гос. комитет по охране окружающей среды ХМАО, 2000. 129 с.
9. О состоянии окружающей природной среды Ханты-Мансийского автономного округа в 2000 году. – Ханты-Мансийск: НПЦ «Мониторинг», 2002. 130 с.
10. Состояние окружающей среды Ханты-Мансийского автономного округа в 1998 г. Обзор. – Ханты-Мансийск, 1999. 288 с.

11. Состояние окружающей среды Ханты-Мансийского автономного округа в 1999 г. Обзор. — Ханты-Мансийск, 2000. 302 с.
12. Состояние окружающей среды Ханты-Мансийского автономного округа в 2000 г. Обзор. — Ханты-Мансийск, 2001. 314 с.
13. Состояние окружающей природной среды и природных ресурсов в Нижневартовском районе в 2000-2002 гг. Обзор. Выпуск № 5. — Нижневартовск: Приобье, 2003. — 126 с.
14. Макунина А.А. Дифференциация природно-территориальных комплексов (ландшафтная структура) / А.А. Макунина, Н.С. Селезнева // Региональный географический прогноз. — М., 1980. — Вып. 2. — С. 59-80.
15. Макаренкова И.Ю. Современное экологическое состояние водных объектов на территории месторождений Среднего Приобья / И.Ю. Макаренкова // Современное состояние водных биоресурсов. Новосибирск, 2008. — С. 307-313.
16. Сивоконь И.С., Шор Е.Л. Анализ современного состояния природной среды в районе Ватинского нефтяного месторождения / И.С. Сивоконь, Е.Л. Шор // Биол. ресурсы и природопользование. — Нижневартовск: Нижневарт. пед. ин-т, 1997. — Вып. 1. — С. 99-113.
17. Толкачева В.В. Оценка загрязненности озера Самотлор / В.В. Толкачева // Успехи современного естествознания. — 2004. — № 10. — С. 81-82.
18. Скоробогатова О.Н. Первые сведения о водорослях озер Вильнет и Самотлор (Западная Сибирь, ХМАО-ЮГРА) / О.Н. Скоробогатова, И.Ю. Усманов // В мире научных открытий. — 2016. — № 5 (77). — С. 146-161.
19. Барина С.С. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды / С.С. Барина, Л.А. Медведева, О.В. Анисимова // Тель-Авив: Ин-т эволюции ун-та Хайфы, 2006. 498 с.
20. Оксий О.П. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши / О.П. Оксий, В.Н. Жукинский, Л.П. Брагинский и др. // Гидроб. журн. — 1993. — Т. 29. — Вып. 4. — С. 62-76.
21. Vinokurova G.V. Taxonomic composition and ecology of phytoplankton and phytobenthos of lake Samotlor (the western Siberia, Russia) / G.V. Vinokurova // Hydrobiol. J. — 2021. — Т. 57. — № 5. — С. 38-47.
22. Копырина Л.И. Эпифитные водоросли озер долины Туймаада Центральной Якутии / Л.И. Копырина // И-ск: Наука, 2014. 100 с.
23. Гоголева О.А. Углеводородокисляющие микроорганизмы природных экосистем / О.А. Гоголева, Н.В. Немцева // Бюл. Оренб. науч. центра УрО РАН (электронный журнал). — 2012. — № 2. — С. 1-7.
24. Фахрутдинов А.И. Нефтедеструктивная активность донных отложений озер, загрязненных углеводородами / А.И. Фахрутдинов, Т.Д. Ямпольская, А.А. Зубайдулин // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2016. — Т. 18. — № 2 (2). — С. 534-543.

25. Njobuenwu D.O. Modelling spreading rate force of petroleum spill on placid aquatic medium / D.O. Njobuenwu // J. of Science and Techn. research. - 2004. - 3 (3). - P. 48-52.
26. Eshagberi G.O. The Effects of Oil Pollution on the Environment / G.O. Eshagberi // The Nigerian Academic Forum. - 2012. - Vol. 23. - № 1. - P. 1-8.
27. Емельянова Е.К. Микроорганизмы природных биоценозов для биоремедиации почв и водных объектов Сибири, загрязненных нефтепродуктами // Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Кольцово. - 2009. - 23 с.
28. Назина Т.Н. Микробиологическая характеристика нефтяных месторождений полуострова Мангышлак/ Т.Н. Назина, А.Е. Иванова, А.В. Благоев // Микробиология. - 1992. - Т. 61. - N. 2. - С. 316-322.
29. Назина Т.Н. Микроорганизмы нефтяных пластов и использование их в биотехнологии повышения нефтеотдачи: автореферат дис. докт. биол. наук: 03.00.07 / Ин-т микробиологии РАН. - Москва, 2000. - 67 с.
30. Величко И.М. Экологическая физиология зеленых нитчатых водорослей / И.М. Величко // Киев: Наук. Думка, 1982. 117 с.
31. Куклин А.П. Нитчатые водоросли озера Кенон как объект биоремедиации / А.П. Куклин // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исслед-й. - 2017. - № 3. - С. 85-88.
32. Ильинский В.В. Углекислородфиксирующие бактериоценозы незагрязненных пресных вод и их изменения под влиянием нефтяных углеводородов (на примере юго-восточной части Можайского водохранилища) / В.В. Ильинский, О.В. Поршнева, Т.И. Комарова и др. // Микробиология. - 1998. - № 2. - С. 267-273.
33. Кузнецов А.Н. Закономерности трансформации нефтяного загрязнения в водных экосистемах / А.Н. Кузнецов // Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. - Ростов-на-Дону. - 2005. - 27 с.
34. Ellis В.Е. Degradation of phenolic compounds by fresh-water algae / В.Е. Ellis // Plant Sci. Lett. - 1977. - V. 8. - P. 213-216.
35. Cerniglia С.Е. Oxidation of Naphthalene by Cyanobacteria and Microalgae / С.Е. Cerniglia, Т.Г. David, С. Van Baalen // J. of General Microbiol. - 1980. - V. 116. - P. 495-500.
36. O'Brien Patrick Y. The effects of oils and oil components on algae: a review / P.Y. O'Brien, P.S. Dixon // British Phycol. J. - 1976. - V. 11:2. - P. 115-142.
37. Walker J.D. Degradation of Petroleum by an Alga, *Prototheca zopfii* / J.D. Walker, R.R. Colwell, L. Petrakis // Applied Microbiology. - 1975. - Vol. 30. - № 1. - P. 79-81.
38. Справочник химика 21 Химия и химическая технология. [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.chem21.info/info/176786/> (дата обращения: 20.04.2022).

---

**Сведения об авторах**

---

**Винокурова Галина Владимировна**, 1964 г.р. Окончила Новосибирский государственный университет по специальности «биология» в 1989 году. Кандидат биологических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Область научных интересов: водоросли разнотипных водных объектов, фитопланктон, фитоперифитон, водоросли экстремальных мест обитания.

**Кириллов Владимир Викторович**, 1953 г.р. Окончил Новосибирский государственный университет по специальности «биология», квалификация «эколог» в 1978 г. Заведующий Лабораторией водной экологии Института водных и экологических проблем СО РАН, кандидат биологических наук. Область научных интересов: системная экология, междисциплинарные исследования состава, структуры, функционирования и эволюция водных экосистем, экологическая безопасность при многоцелевом использовании водных объектов.

**Лушников Сергей Валерьевич**, 1953 г.р. Окончил Томский институт автоматизированных систем управления и радиоэлектроники по специальности «радиоинженер» в 1978 г. Генеральный директор НТО «Приборсервис». Область научных интересов: экология, машиностроение, медицина.

**Франк Юлия Александровна**, 1980 г.р. Окончила Томский государственный университет, квалификация «магистр биологии», в 2003 г. Доцент кафедры ихтиологии и гидробиологии биологического института Томского государственного университета. Область научных интересов: гидроэкология, загрязнение поверхностных вод.

---

**Участие авторов**

---

Винокурова Г.В. — обработка полевых материалов, анализ химических и биологических показателей, написание текста статьи.

Кириллов В.В. — организация проведения полевых работ, сбор полевых материалов, анализ лимнологических процессов, написание текста статьи.

Лушников С.В. — руководство проектом, анализ процессов трансформации загрязняющих веществ в водоеме, работа с текстом статьи.

Франк Ю.А. — сбор и обработка полевых материалов, анализ химических показателей, составление картографических материалов, работа с текстом статьи.

Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 31.08.2023 г., принята к публикации 29.09.2023 г.

The article was submitted on August 31, 2023, accepted for publication on September 29, 2023.