

6. Tedeev T.R. Metodologiya i algoritmy rascheta poley vlazhnosti v zadachakh proektirovaniya gruntovykh sooruzheniy [Methodology and Algorithms for Calculating Moisture Fields in Problems of Design of Soil Structures] / T.R. Tedeev, G.G. Arunyants. - Vladikavkaz: Terek, 2005. - 203 p. [in Russian]
7. Samarsky, A.A. Regimy s obostreniem v zadachakh dlia kvazilineynykh parabolicheskikh uravneniy [Regimes with Peaking in Problems for Quasilinear Parabolic Equations] // A.A. Samarskiy, V.A. Galaktionov, S.P. Kurdyumov, A.G. Mikhailov. - M.: Science, 1987. - 476 p. [in Russian]
8. Karl Terzaghi, Ralfh B. Peck, Golamreza Mesri. Soil Mechanics in Engineering Practice / Karl Terzaghi, Ralfh B. Peck, Golamreza Mesri // Third Edition, 1995, 549 p.
9. Steven L. Kramer. Geotechnical Earthquake Engineering / Steven L. Kramer // University of Washington, 1996, 653 p.
10. James K. Mitchell. Fundamentals of soil behavior / James K. Mitchell // second Edition, 1993, 437 p.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.054>

Чебыкин Е.П.¹, Мальник В.В.², Фёдорова Л.И.³, Минаев А.В.⁴, Сутурин А.Н.⁵

¹ORCID: 0000-0002-7588-3886, кандидат химических наук,

²ORCID: 0000-0002-1221-2794, кандидат биологических наук, ³аспирант,

⁴ORCID: 0000-0003-1577-8440, И.о. зав. отделом инновационной деятельности,

⁵ORCID: 0000-0002-6805-5986, кандидат геолого-минералогических наук,

Иркутский научный центр СО РАН, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

ИЗУЧЕНИЕ АДЕНОЗИНТРИФОСФАТА В АКВАТОРИИ ПОСЕЛКА ЛИСТВЯНКА (ЮЖНЫЙ БАЙКАЛ) КАК ЭКСПРЕССНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРИЗНАКА РАЗВИТИЯ ЭВТРОФИКАЦИИ

Аннотация

Акватория п. Листвянка (Южный Байкал) является полигоном для разработки эффективных комплексов мониторинга антропогенного влияния на прибрежные байкальские экосистемы. В результате гидро-геофизических электротомографических работ выявлены участки субаквальной разгрузки подземных вод. Анализ содержания аденозинтрифосфата в воде позволяет выделить зоны антропогенного влияния и выявить участки эвтрофирования I стадии. Метод АТФ является экспрессным и высокочувствительным, позволяет оценить количество живых микробных и планктонных сообществ в воде.

Ключевые слова: акватория п. Листвянка (Южный Байкал), эвтрофикация, электротомография, аденозинтрифосфат (АТФ), мониторинг.

Chebykin E.P.¹, Malnik V.V.², Fedorova L.I.³, Minaev A.V.⁴, Suturin A.N.⁵

¹ORCID: 0000-0002-7588-3886, PhD in Chemistry, ²ORCID: 0000-0002-1221-2794, PhD in Biology,

³Postgraduate student, ⁴ORCID: 0000-0003-1577-8440, Acting Head of the Innovation Activity Department,

⁵ORCID: 0000-0002-6805-5986, PhD in Geology and Mineralogy, Irkutsk Scientific Center of the SB RAS, Limnological

Institute of the SB RAS, Irkutsk

STUDY OF ADENOSINE TRIPHOSPHATE (ATP) IN AQUATORIES OF LISTVYANKA VILLAGE (SOUTH BAIKAL) AS EXPRESSIVE INFORMATION SIGN OF EUTROPHICATION DEVELOPMENT

Abstract

The water area of Listvyanka village (South Baikal) is a polygon for developing effective complexes for monitoring anthropogenic impact on coastal Baikal ecosystems. As a result of hydro-geophysical electrotomographic works, the areas of sub-aquiferous groundwater discharge have been identified. The analysis of the content of adenosine triphosphate (ATP) in water allowed us to identify zones of anthropogenic influence and to identify the areas of eutrophication of the first stage. The ATP method is rapid and highly sensitive, it allows to estimate the number of living microbial and plankton communities in water.

Keywords: water area in Listvyanka village (South Baikal), eutrophication, electrotomography, adenosine triphosphate (ATP), monitoring.

В акватории п. Листвянка (Южный Байкал) проявлены все элементы экологического стресса на Байкале, ведущие к кардинальным изменениям в прибрежных экосистемах [1]. Разработка новых эффективных и экспрессных методов выявления антропогенного влияния на экосистему является важной задачей для подготовки мер преодоления экологического кризиса.

По предложению В.И. и С.Д. Авиловых [2], [3] на базе комплексных морских биогеохимических исследований обосновано включение в качестве существенных информационных признаков состояния водных экосистем показателей аденозинтрифосфата (АТФ). Измерение АТФ в совокупности с рядом других биохимических показателей (в частности, щелочная фосфомоноэстераза) позволяет выявить динамику изменения микробных сообществ от зарождения и развития до цветения (эвтрофикация I стадии) и гибели (токсикации) как в воде, так и в донных отложениях [4]. Распределение АТФ по глубине водной толщи позволяет оценить суммарную обсеменённость живыми клетками бактерио- и фитопланктона, а ниже фотического слоя – бактериопланктона [5]. В период геоэкологических исследований на Байкале было изучено вертикальное и пространственное распределение АТФ в водной толще [6]. Установлено, что подобно океаническим профилям, содержание АТФ в фотическом слое (до глубины 200 м) Байкала гораздо выше, по сравнению с глубинными, и повышается в придонных слоях. Содержание АТФ не опускается ниже 100 нг/л, и в среднем для «ядра» Байкала (глубже 200 м и 120 м над дном) составляет 290 нг/л, что свидетельствует о протекании первично-биохимических процессов на довольно высоком уровне во всей толще воды. В придонной воде районов с интенсивной разгрузкой газов (He, H₂, CO₂, CH₄) и на мелководных станциях, испытывающих взаимное влияние фотической и придонной зон, наблюдаются наибольшие значения АТФ

(до 5400 нг/л).

В связи с интенсивным развитием туризма на Байкале (в последние 10 лет) и отсутствием природоохранной инфраструктуры антропогенное влияние на литораль озера значительно возросло [1]. АТФ – наиболее экспрессная и информативная характеристика различных этапов эвтрофирования – может быть использована для выявления и мониторинга антропогенных потоков биогенных элементов, поступающих в прибрежную зону озера и интенсифицирующих рост биомассы.

Цель данной работы – исследовать распределение АТФ в воде литорали Байкала в зоне влияния п. Листвянка – одного из участков, испытывающих сильное антропогенное воздействие.

Материалы и методы

Описание района работ, отбор проб

Отбор проб воды на пяти трансектах в литорали Байкала был произведен в зоне влияния р. Сеннушка и кафе «Алании» в п. Листвянка 30 сентября 2017 г. (рис. 1). Места закладки трансект выбирали по данным электрических сопротивлений грунтов, полученных методом электротомографии [7], [8], [9] с помощью автономной многоэлектродной электроразведочной станции «СКАЛА 48» и модифицированной донной электроразведочной косой с дополнительной гидроизоляция контактов подключения, разъемом подключения к станции с одной стороны для работы с лодки. Траектория профиля и значения электрических сопротивлений показаны на рисунке 1.

Интерстициальную воду отбирали из лунок на берегу в заплесковой зоне. Далее вдоль трансекты отбирали пробу воды на расстоянии 1 м от уреза, затем с помощью водолаза-исследователя – пробы поверхностной и придонной воды на расстоянии 5, 10, 20, 30, 40 и 50 м от уреза. Пробы воды отбирали в 0,5 л ПЭТ бутылки, помещали в термос-сумки и обрабатывали в лаборатории в тот же день.

Микробиологический анализ

Образцы воды в количестве 1 мл наносили на тест-пластины Petrifilm компании 3М (США) для определения количества мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ или общее микробное число – ОМЧ, Cat. No. 6406), гетеротрофных микроорганизмов (Aqua, No. 6452), колиформных бактерий (Aqua, No. 6458), кишечной палочки *E. coli* и колиформных (БГКП – бактерии группы кишечной палочки) бактерий (Cat. No. 6414) и количества бактерий семейства Enterobacteriaceae (Cat. No. 6421). Также использовали высокочувствительные пластины для выявления колиформных (в том числе и термотолерантных) бактерий (Cat. No. 6415) при объеме образца равном 5 мл. Температуру и длительность инкубации выдерживали согласно рекомендациям производителя: КМАФАнМ – 30 °С, 48 ч., гетеротрофных микроорганизмов – 22 °С, 68 ч., *E. coli* и колиформных бактерий – 37 °С, 24 ч., энтеробактерий – 37 °С, 24 ч., термотолерантных колиформных бактерий – 44 °С, 24 ч. Интерпретацию результатов посевов проводили согласно «Руководствам по интерпретации» от производителя, подсчет колониобразующих единиц (КОЕ) выполняли вручную с помощью увеличительного стекла.

Определение содержания АТФ в водных пробах

Содержание АТФ (в относительных световых единицах – ОСЕ) в водных пробах определяли с помощью люменометра 3М Clean-Trace NG (компания 3М, США). Прибор калибровали с помощью контрольных АТФ тест-систем для воды LWATP10. Образцы воды в количестве 20 мл наливали в одноразовые стерильные полипропиленовые пробирки с закручивающейся крышкой (50 мл, Greiner bio-one, Cat.-No. 210261, Германия), опускали на 1 минуту АТФ-тесты для воды AQT200, которые затем помещали в прибор и проводили измерение люминесценции

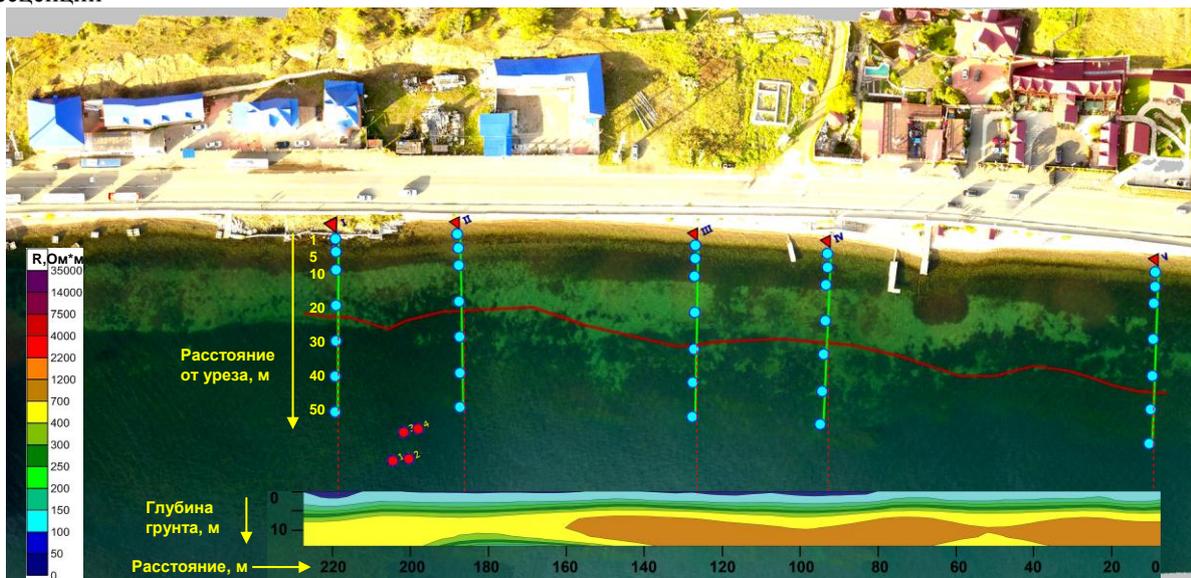


Рис. – Карта-схема (фотосъемка с БПЛА Phantom-4, привязка в программе SAS. Планета) отбора проб воды на трансектах в литорали Байкала в зоне влияния р. Сеннушка и кафе «Алании» (п. Листвянка, Южный Байкал) 30 сентября 2017 г. и геоэлектрический профиль (красная линия), полученный методом электротомографии с помощью автономной многоэлектродной электроразведочной станции «СКАЛА 48» 25 июля 2017 г.

Красными треугольниками отмечены места закладки трансект (там же лунки) на расстоянии до 50 м от уреза, перпендикулярно берегу (точки отбора поверхностных и придонных вод отмечены голубыми кружками); красными кружками отмечены четыре точки в «зоне А» (60 м от бетонной стенки) субаквальной разгрузки загрязнённых подземных вод (по результатам исследования в апреле 2017 г.).

Результаты и обсуждение

Наибольшее содержание АТФ (2000-2500 ОСЕ, рис. 2), характеризующее наличие живых бактерий и микроводорослей обнаружено в придонной воде на трансекте I в 5, 30, и 40 м от уреза, что совпадает с геофизическими данным, согласно которым, наибольшие по глубине проникновения в грунт потоки минерализованных вод сосредоточены на пересечении с трансектой I (рис. 1). Распределение АТФ не похоже на распределение ОМЧ (общее микробное число) и гетеротрофов (табл. 1), что указывает на то, что в этот интегральный параметр вносят весомый вклад микроводоросли. Высокие значения АТФ (1100-1500) также обнаружены в придонной воде на трансекте II в 10 и 30 м от уреза, что частично согласуется с распределением санитарно-показательных микроорганизмов – ОКБ (общих колиформных бактерий), ТКБ (термотолерантных колиформных бактерий), энтеробактерий – наибольшее содержание которых, превышающее установленные нормативы, обнаружены в придонной воде на трансекте II в 10, 30 и 50 м от уреза воды (табл. 1). Окончание трансекты II весьма близко к ранее обнаруженным (апрель 2017 г.) признакам субаквальной разгрузки антропогенно загрязнённых стоков в «зоне А» (точки 1-4 на рис. 1). Эта зона расположена между трансектами I и II, и вероятно испытывает влияние интенсивной разгрузки подземных вод в районе трансекты I, маркируемой геоэлектрическим профилем.

Наличие кишечной палочки *E. coli* в количестве 100 КОЕ / 100 мл обнаружено в двух случаях – в интерстициальной воде в лунке на трансекте I и в придонной воде на трансекте III в 20 м от уреза. Её количество не превышает нормативов США (126 КОЕ/ 100 мл [10]) для пресных вод.

Таким образом, метод АТФ является весьма эффективным и экспрессным, он позволяет выделять пятна эвтрофикации, согласующиеся с данными электротомографии. Использование показателей аденозинтрифосфата (АТФ) для выявления динамики эвтрофикации перспективно для экологического мониторинга прибрежных экосистем оз. Байкал.

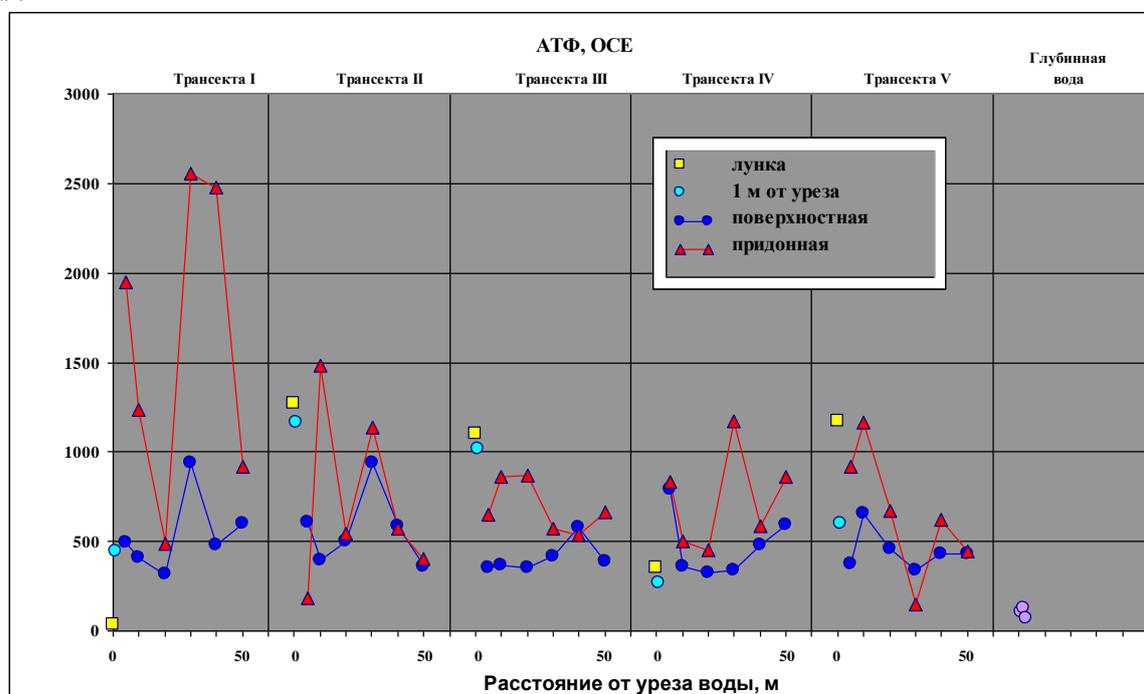


Рис. 2 – Содержание АТФ (в относительных световых единицах) в интерстициальной, поверхностной и придонной воде по трансектам (на удалении до 50 м от уреза воды) в литорали оз. Байкал в зоне влияния р. Сеннушка и кафе «Алания» (30 сентября 2017 г.) в сравнении с глубиной (500 м) байкальской водой (водозабор ООО «Вода Байкала», п. Листвянка)

Таблица 1 – АТФ и микробиологические характеристики интерстициальной, поверхностной и придонной воды на трансектах в литорали оз. Байкал в зоне влияния р. Сеннушка и кафе «Алания» (п. Листвянка) 30.09.2017 г. в сопоставлении с существующими нормативами

Шифр	Расстояние от уреза, м	АТФ, ОСЕ	ОМЧ, КОЕ / мл	Гетеротрофы, КОЕ / мл	ОКБ, КОЕ / 100 мл	ТКБ, КОЕ / 100 мл	Энтеробактерии, КОЕ / 100 мл
T1-л	0	33	5000	2200	100	0	1000
T1-1	1	445	157	144	0	0	0
T1-5	5	491	26	51	0	0	0
T1-10	10	410	75	80	0	0	0
T1-20	20	317	198	213	0	0	0
T1-30	30	938	202	158	0	0	0
T1-40	40	477	700	394	0	0	0
T1-50	50	599	82	111	0	0	0
T1-5*	5	1950	99	150	0	0	0
T1-10*	10	1236	24	70	0	0	0

Продолжение Таблицы 1

Шифр	Расстояние от уреза, м	АТФ, ОСЕ	ОМЧ, КОЕ / мл	Гетеротрофы, КОЕ / мл	ОКБ, КОЕ / 100 мл	ТКБ, КОЕ / 100 мл	Энтеробактерии, КОЕ / 100 мл
T1-20*	20	489	24	55	0	0	0
T1-30*	30	2556	148	508	0	20	0
T1-40*	40	2481	144	212	0	0	0
T1-50*	50	921	29	50	0	0	0
T2-л	0	1274	390	1540	100	100	100
T2-1	1	1165	63	92	0	0	0
T2-5	5	607	33	87	0	0	0
T2-10	10	398	1480	1380	0	0	0
T2-20	20	503	44	55	0	0	0
T2-30	30	942	586	960	0	0	0
T2-40	40	584	540	601	0	0	0
T2-50	50	363	306	270	0	0	0
T2-5*	5	182	135	271	0	0	0
T2-10*	10	1485	214	256	700	120	300
T2-20*	20	547	19	48	0	0	0
T2-30*	30	1139	800	980	2200	220	1200
T2-40*	40	570	31	60	100	0	0
T2-50*	50	405	565	1040	2100	200	2500
T3-л	0	1101	1580	1420	100	0	2900
T3-1	1	1017	30	221	0	0	100
T3-5	5	350	26	78	0	0	100
T3-10	10	365	161	222	0	0	100
T3-20	20	351	700	840	0	0	100
T3-30	30	415	22	69	0	0	0
T3-40	40	582	27	34	0	0	0
T3-50	50	391	139	159	0	0	0
T3-5*	5	646	37	114	0	0	0
T3-10*	10	858	32	114	0	0	200
T3-20*	20	865	21	48	0	0	100
T3-30*	30	571	159	149	0	0	0
T3-40*	40	535	138	163	0	20	0
T3-50*	50	663	157	920	0	0	300
T4-л	0	350	1800	4220	600	160	4600
T4-1	1	271	152	275	0	0	200
T4-5	5	792	104	153	0	0	0
T4-10	10	362	61	117	0	0	100
T4-20	20	322	15	63	0	0	0
T4-30	30	336	386	720	0	0	200
T4-40	40	481	30	32	0	0	200
T4-50	50	590	17	73	0	0	0
T4-5*	5	834	148	224	0	0	100
T4-10*	10	504	31	89	0	0	0
T4-20*	20	455	1360	1760	0	0	0
T4-30*	30	1172	920	1200	0	0	0
T4-40*	40	588	548	1160	0	0	100
T4-50*	50	858	164	219	0	0	100
T5-л	0	1175	4400	5400	0	20	13100
T5-1	1	602	55	227	0	0	0
T5-5	5	372	17	94	0	0	0
T5-10	10	660	30	55	0	0	0
T5-20	20	462	2220	3800	0	0	0
T5-30	30	338	193	600	0	0	0
T5-40	40	434	92	210	0	0	0
T5-50	50	433	68	126	0	0	0
T5-5*	5	920	82	286	0	0	0
T5-10*	10	1166	4000	5400	0	0	0
T5-20*	20	674	31	109	0	0	0
T5-30*	30	151	27	560	0	0	0
T5-40*	40	619	66	189	0	0	0

Продолжение Таблицы 1

Шифр	Расстояние от уреза, м	АТФ, ОСЕ	ОМЧ, КОЕ / мл	Гетеротрофы, КОЕ / мл	ОКБ, КОЕ / 100 мл	ТКБ, КОЕ / 100 мл	Энтеробактерии, КОЕ / 100 мл
T5-50*	50	442	880	1520	0	0	0
BW нас	1700	105	0	1	0	0	0
BW вход	1700	130	96	127	0	0	0
BW вых	1700	69	25	28	0	0	0
Тип вод		нд	Питьевая вода	нд	Для рекреационных целей	Для рекреационных целей	Пресная вода
Страна		нд	Россия	нд	Россия	Россия	США
Норматив		нд	100	нд	500	100	35 (энтерококки)
Документ		нд	СанПиН 2.1.4.1116-02	нд	СанПиН 2.1.5.980-00	СанПиН 2.1.5.980-00	[10]

Примечание: значения, превышающие нормативы выделены жирным шрифтом. нд – нет данных (норматив не установлен). * – придонная вода. **BW нас** – глубинная байкальская вода (500 м), насосная глубинного водозабора ООО «Вода Байкала» (п. Листвянка, ул. Академическая, 1) **BW вход** – цех розлива ООО «Вода Байкала», после фильтрации. **BW вых** – цех розлива ООО «Вода Байкала», конечная ёмкость (1 сутки после озонирования).

Список литературы / References

1. Сутурин А. Н. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали / А. Н. Сутурин, Е. П. Чебыкин, В. В. Мальник и др. // География и природные ресурсы. – 2016. – № 6. – С. 43–54.
2. Авилов В. И. Информационная система аквагеоэкологии / В. И. Авилов, С. Д. Авилова. – М.: «Прима Пресс». – 2009. – 142 с.
3. Авилов В. И. Изучение экосистем в аквагеоэкологии / В. И. Авилов, С. Д. Авилова. – М.: «Прима Пресс». – 2010. – 184 с.
4. Геодекян А. А. Геоэкологические исследования и прогнозирование экологического состояния природной среды / А. А. Геодекян, В. И. Авилов, С. Д. Авилова // Доклады Академии наук. – 1992. – Т. 324 (2). – С. 415–419.
5. Holm-Hansen O. The measurement of adenosine triphosphate in the ocean and its ecological significance / O. Holm-Hansen, C. R. Booth // Limnology and Oceanography. – 1966. – V. 11 (4). – P. 510–519.
6. Геодекян А. А. Геоэкологические исследования Байкала / А. А. Геодекян, В. И. Авилов, С. Д. Авилова // Доклады Академии наук СССР. – 1990. – Т. 310 (6). – С. 1442–1446.
7. Якубовский Ю. В. Электроразведка, 3 изд., переработанное и дополненное / Ю. В. Якубовский, И. В. Ренард. – М.: Недра. – 1991. – 358 с.
8. Матвеев Б. К. Интерпретация электромагнитных зондирований / Б. К. Матвеев. – М.: Недра. – 1974. – 232 с.
9. Марченко М. Н. Вертикальное электрическое зондирование. Учебное пособие для студентов обучающихся по направлению «Геология» / М. Н. Марченко, И. Н. Модин. – М.: МГУ. – 2013. – 28 с.
10. United States Environmental Protection Agency. (2011, November 30). Ambient Water Quality Criteria for Bacteria / United States Environmental Protection Agency. – Retrieved December 11, 2013 [Электронный ресурс] // URL : Available at: http://water.epa.gov/learn/training/standardsacademy/upload/module_bacteriacriteria.pdf

Список литературы на английском языке / References in English

1. Suturin A. N. Rol' antropogennykh faktorov v razvitiy jekologicheskogo stressa v litorali [The role of anthropogenic factors in the development of ecological stress in Lake Baikal littoral (the Listvyanka settlement lakescape)] / A. N. Suturin, E. P. Chebykin, V. V. Mal'nik and others // Geografija i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]. – 2016. – No. 6. – P. 43–54. [in Russian]
2. Avilov V. I. Informatsionnaya sistema akvageoekologii [Information system of Aquageoecology] / V. I. Avilov, S. D. Avilova. – M.: Prima Press, 2009. – 142 p. [in Russian]
3. Avilov V. I. Izuchenie ekosistem v akvageoekologii [The study of ecosystems in Aquageoecology] / V. I. Avilov, S. D. Avilova. – M.: Prima Press, 2010. – 184 p. [in Russian]
4. Geodekyan A. A. Geoekologicheskie issledovaniya i prognozirovanie ekologicheskogo sostoyaniya prirodnoy sredy [Geoecological research and forecasting the ecological state of the natural environment] / A. A. Geodekyan, V. I. Avilov, S. D. Avilova // Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]. – 1992. – V. 324 (2). – P. 415–419. [in Russian]
5. Holm-Hansen O. [The measurement of adenosine triphosphate in the ocean and its ecological significance] / O. Holm-Hansen, C. R. Booth // [Limnology and Oceanography]. – 1966. – V. 11 (4). – P. 510–519.
6. Geodekyan A. A. Geoekologicheskie issledovaniya Baykala [Geoecological study of Lake Baikal] / A. A. Geodekyan, V. I. Avilov, S. D. Avilova // Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the Academy of Sciences of the USSR]. – 1990. – V. 310 (6). – P. 1442–1446. [in Russian]
7. Yakubovskiy, Yu. V. Yakubovskiy Yu. V. Elektrorazvedka, 3 izd., pererabotannoe i dopolnennoe [Goelectric prospecting, 3rd ed., revised and expanded] / Yu. V. Yakubovskiy, I. V. Renard. – Moscow: Nedra. – 1991. – 358 p. [in Russian]

8. Matveev B. K. Interpretatsiya elektromagnitnyih zondirovaniy [Interpretation of electromagnetic soundings] / B. K. Matveev. – Moscow: Nedra. –1974. – 232 p. [in Russian]
9. Marchenko M. N. Vertikalnoe elektricheskoe zondirovanie. Uchebnoe posobie dlya studentov obuchayuschihsya po napravleniyu «Geologiya» [Vertical electric sounding. Textbook for students enrolled in the direction "Geology"] / M. N. Marchenko, Modin I. N. – Moscow: Moscow State University. – 2013. – 28 p. [in Russian]
10. United States Environmental Protection Agency. (2011, November 30). Ambient Water Quality Criteria for Bacteria / United States Environmental Protection Agency. – Retrieved December 11, 2013 [Electronic resource] // URL: Available at: http://water.epa.gov/learn/training/standardsacademy/upload/module_bacteriacriteria.pdf