

ОБЩАЯ ЭКОЛОГИЯ

© Л.В. РАЗУМОВСКИЙ¹, Т.С. ШЕЛЕХОВА², В.Л. РАЗУМОВСКИЙ¹

¹ Институт водных проблем Российской академии наук (Москва)

² Геологический институт Карельского научного центра
Российской академии наук (Петрозаводск)
razum@aquila.laser.ru, selekh@krc.karelia.ru, nethaon@mail.ru

УДК 574.5; 561.26; 582.26

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В МАЛЫХ ОЗЕРАХ СОЧИНСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА (ДИАТОМОВЫЙ АНАЛИЗ)

LONG-TERM GEOECOLOGICAL CHANGES IN SMALL LAKES OF SOCHI NATIONAL PARK (DIATOM ANALYSIS)

АННОТАЦИЯ. В работе анализируются диатомовые комплексы из донных отложений двух бессточных озер, расположенных на территории Сочинского национального парка (Краснодарский край). Оба озера относятся к типовым гидрологическим объектам для обследованной территории. Применен авторский метод графического анализа диатомовых комплексов. Установлено два сценария трансформации их таксономической структуры. Для экосистемы оз. Зеркального характерен только один из сценариев. Он определяется природным воздействием извне, при достаточно стабильных параметрах самой экосистемы. Озеро не подвержено процессам зарастания и заболачивания. В оз. Большое выявлено 2 сценария трансформации таксономической структуры диатомовых комплексов, которые соответствуют трем этапам изменений, происходивших в экосистеме озера. Первый, наиболее ранний, этап завершился в начале XX столетия. На этом этапе состояние экосистемы оз. Большое напоминало современное состояние экосистемы оз. Зеркальное. Двум, более поздним, этапам соответствует второй сценарий трансформации. Он характеризует прогрессирующие процессы заболачивания и зарастания акватории озера. Эти процессы характерны для большинства малых озер обследованной территории. Изменения в экосистемах озер, вероятно, связаны как с естественными процессами заболачивания, так и с усиливающимся антропогенным воздействием.

SUMMARY. The purpose of the present study is to explore sediment diatom assemblages from two closed lakes in Sochi national park (Krasnodarsky Krai). Both lakes are hydrological objects typical for the area of study. We establish two scenarios of taxonomic structure transformation by using the author's method of graphical analysis for diatom assemblages. The ecosystem in Lake Zerkal'noe is characterized by only one scenario. It is defined through the outer impact with sufficiently stable inner parameters of the ecosystem. Processes of overgrowing and swamping are not observed in this lake. Two scenarios of taxonomic structure transformation for diatom assemblages were

found in Lake Bolshoe. These scenarios correspond to three stages of changes which took place in the lake ecosystem. The earliest stage was completed at the beginning of the 20th century. At this stage the state of ecosystem in Lake Bolshoe was similar to the current ecosystem's state in Lake Zerkal'noe. The later stages correspond to the second scenario of transformation. It describes progressive processes of swamping and overgrowing of a lake area. These processes are common for the most part of the small lakes in the studied area. Probably, these changes in the lake ecosystem are related to the natural processes of swamping as well as to the increasing anthropogenic impact.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Малые озера, графический анализ, процессы заболачивания, антропогенная нагрузка.

KEY WORDS. Small lakes, graphical analysis, swamping, anthropogenic impact.

Введение. Малые озера, имеющие площадь водного зеркала менее 1 км², являются традиционными объектами для палеоэкологических и палеоклиматических реконструкций. Это связано с тем, что донные отложения в малых озерах содержат, как правило, непрерывную летопись событий прошлого, которую можно расшифровать с высоким временным разрешением. Исследованные озера Большое и Зеркальное отвечают всем этим характеристикам — это малые бессточные озера, являющиеся природными седиментационными ловушками. Кроме того, их выбор, как объектов исследования, определялся разным уровнем антропогенной нагрузки, которую они испытывают. Из всех бессточных озер Сочинского национального парка оз. Большое подвержено самому сильному и длительному антропогенному воздействию. Напротив, антропогенная нагрузка на оз. Зеркальное минимальна из-за его труднодоступности.

В последние десятилетия изучение новейших изменений климата, протекавших в эпоху позднего голоцена, вышло на новый качественный уровень достоверности. Это было определено разработкой и внедрением новых и совершенствованием известных методов изотопного датирования озерных отложений, а также последовавшими за этим успехами в моделировании климата [1], [2].

При оценке трансформаций, происходящих в озерных экосистемах во времени и пространстве, широко используется метод диатомового анализа. Диатомовые водоросли (класс *Bacillariophyceae*, отдел *Ochrophyta*) — доминирующая в озерах группа водорослей, которая хорошо сохраняется в осадках благодаря наличию кремнеземного панциря. В данной работе применен метод графического анализа таксономических пропорций в диатомовых комплексах [3], [4].

Описание района исследований. На крайней восточной оконечности хребта Ачишхо, в 4 км к северу от пос. Красная Поляна, в 2.5 км от бывшей метеостанции расположены четыре сравнительно крупных, сильно заросших озера, имеющих общее название — озера Хмелевского. Чтобы избежать путаницы, этим озерам были даны названия: Большое, Восточное, Южное и Западное. В районе бывшей метеостанции расположено оз. Зеркальное. В отличие от соседствующих озер (оз. Туманное и др.) оно почти не заросло.

Происхождение озер Хмелевского, как и озер в районе бывшей метеостанции, тектоническое. Образованию озер способствовало наличие обращенного рельефа — синклинальный прогиб в процессе разрушения стал широким гребнем хребта, а его вогнутая форма способствовала образованию отрицательных форм рельефа будущих озерных котловин. Все упомянутые озера бессточные.

Оз. Большое — самое крупное в группе Хмелевских озер ($43^{\circ}43.03'$ с.ш. и $40^{\circ}11.98'$ в.д.). Его площадь составляет 9390 м^2 ; длина — 194 м ; максимальная ширина — 82 м ; максимальная глубина — 2 м . Озеро лежит в овальной котловине, вытянутой с северо-запада на юго-восток, с наибольшим расширением в юго-восточной части. Урез зеркала воды расположен на высоте 1752.2 м над у. м. Питание озера осуществляется за счет атмосферных осадков, талых вод и, в меньшей степени, грунтовых вод. Максимальная температура воды в озере наблюдается в июле ($+14^{\circ} \text{С}$). Зимой озеро промерзает полностью, до дна. На озере развита водно-болотная растительность (озеро заросло на $60-70\%$).

Озеро Зеркальное. Его точные координаты $43^{\circ}43.38'74''$ с.ш. и $40^{\circ}10.23'17''$ в.д. Это высокогорное озеро (1888 м над у. м.) можно отнести к категории сверхмалых (менее $0,01 \text{ км}^2$). Ширина озера 57 м , длина 60 м , максимальная измеренная глубина 2.3 м . Озеро имеет правильную, близкую к округлым очертаниям форму. Озеро непроточное, поступление воды смешанное, снежно-дождевое. В силу мелководности температурная стратификация отсутствует. Зимой озеро промерзает до дна.

Методика исследования. Структуру и объем первичного материала составили колонки донных отложений (ДО) длиной 40 см (оз. Большое) и 35 см (оз. Зеркальное), которые были отобраны стратометром ударно-замыкающего типа (04.09.06 и 01.08.12 соответственно), в точках наибольшей глубины озер Большое (2 м) и Зеркальное (2.2 м). Обработка проб на диатомовый анализ, изготовление и просмотр постоянных препаратов осуществлялись по стандартным методикам [5], [6], [7].

Определение возраста донных отложений водоемов проводилось радиометрическим методом с использованием моделей датирования CRS и C1C на основе хронологии $^{10}\text{РБ}$, в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН по стандартным методикам [8, 9].

При исследовании трансформаций озерных экосистем использовался метод графического анализа таксономических пропорций [3, 4]. Метод графического анализа состоит в следующем: при построении графиков по оси абсцисс откладывается число идентифицированных таксонов видового и более низкого рангов (далее в тексте — таксонов), а по оси ординат — их относительная численность. Таксоны ранжируются по показателю относительной численности в сторону его уменьшения. По относительной численности таксоны разделяют на группы: доминирующие (обычно не менее $8-10\%$ от комплекса), сопутствующие (более $1-2\%$) и редкие (обычно менее 1%). В результате, в линейной системе координат строится исходный график или гистограмма. Анализ полученных графиков (гистограмм) проводился по упрощенной схеме: только в билогарифмической системе координат. В билогарифмической системе координат анализируются не сами графики, а их тренды, представленные результирующими прямыми линиями.

В билогарифмической системе координат результирующие линии строились двумя способами: с учетом всего спектра таксонов (чтобы не потерять часть информации), и только с учетом доминирующих и сопутствующих таксонов. В последнем случае $1/3$ от общей относительной численности, т.е. «хвост» гистограммы, не учитывалась. Во всех случаях в билогарифмической системе координат для результирующих линий рассчитывался коэффициент детерминации (R^2), позволяющий оценить статистическую достоверность проводимых графических построений. Достоверность оценивалась по коэффициенту корреляции (r).

Результаты и их обсуждение. В колонке ДО из оз. Большого было определено 64 таксона. Только 7 таксонов относятся к группам доминирующих и сопутствующих, а остальные встречаются редко. Для оз. Большое в билогарифмической системе координат было выявлено 3 стадии трансформации диатомовых комплексов, которые представлены тремя генерациями результирующих линий (рис. 1).

В верхней и средней части разреза озерных отложений построенные графики представлены двумя генерациями параллельных результирующих линий. Одна генерация «занимает» в колонке донных отложений интервал от 0 до 16 см глубины, а вторая располагается в интервале от 18 до 26 см (рис 1а, б).

Разделение двух генераций результирующих линий определяется разным углом их наклона. В самом нижнем интервале колонки (от 26 до 40 см) результирующие линии имеют выраженный центр локализации («разворота») который в дальнейшем был утрачен. Наличие центра «разворота» в нижней части колонки ДО свидетельствует, что на этом, более раннем, этапе в озере существовал доминирующий комплекс таксонов, обеспечивающий трофо-метаболическую целостность экосистемы озера (рис. 1в).

В оз. Зеркальное был идентифицирован 71 таксон диатомовых водорослей; 10 таксонов входят в группы доминирующих и сопутствующих. Анализ графиков, проведенных в билогарифмической системе координат, не выявил для таксономической структуры диатомовых комплексов из оз. Зеркального отдельных этапов трансформации. Полученная генерация результирующих линий имеет выраженный центр локализации и представляет единую, достаточно стабильную озерную экосистему (рис. 2).

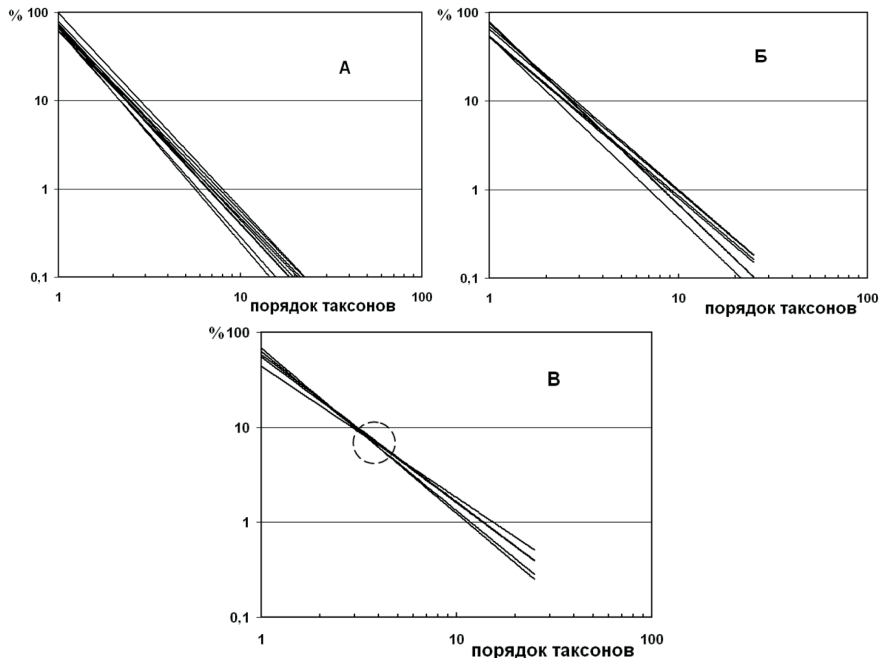


Рис. 1. Трансформация таксономической структуры диатомовых комплексов в оз. Большое (билогарифмическая система координат): а). интервал 0-16 см.; б). интервал 18-26 см.; в). интервал 28-40 см.

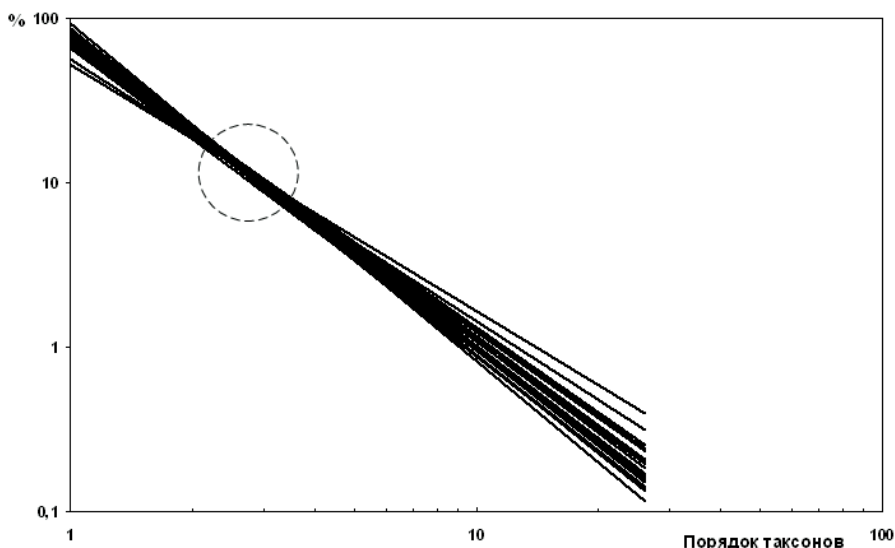


Рис. 2. Трансформация таксономической структуры диатомовых комплексов в оз. Зеркальное (билогарифмическая система координат): интервал 0-35 см.

Использование метода графического анализа таксономических пропорций в диатомовых комплексах позволяет достаточно подробно описать историю развития и функционирования озерных экосистем Большое и Зеркальное в новейшее время. Полнота картины дополняется изотопными датировками, полученными для ДО оз. Большое.

На самых ранних исследованных этапах существования оз. Большое напоминало существующее сейчас оз. Зеркальное. Поверхность озера не зарастала, а дно не заболачивалось. Кроме того, судя по размерам озерной котловины, озеро было значительно больше по своей площади и глубже. Об этом свидетельствует постоянное наличие 2-3 доминирующих видов, обеспечивающих целостность этой озерной экосистемы, что демонстрируется наличием единого центра локализации результирующих линий. Судя по полученным датировкам, этот этап завершился в начале XX столетия. Вполне возможно, что процессы обмеления озера протекали и на более ранних этапах, но процессы зарастания и заболачивания отсутствовали.

Следующий этап, соответствующий процессам естественного заболачивания, проходил до начала 50-х гг. XX столетия. Он соответствует генерации результирующих линий, расположенных параллельно. Такое расположение результирующих линий характерно для озер, в которых протекают процессы быстрого обмеления [10] или, напротив, повышения уровня воды [11, 12].

Вероятно, с середины 50-х гг. к процессу естественного заболачивания добавилась антропогенная нагрузка: выпас домашнего скота, возведение построек и все сопутствующие этому процессы загрязнения акватории озера. В результате активизации процессов эвтрофирования озерных вод, темпы заболачивания и зарастания озера были искусственно ускорены. Это выражено в следующей генерации результирующих линий, характеризующих существующую экологическую обстановку. Вероятно, та же участь постигла и экосистемы других озер:

Западного, Восточного, Южного, Туманного, а также более мелких безымянных бессточных водоемов, расположенных на этой территории. Это привело к изменению трофического статуса малых водоемов, сукцессионным перестройкам, их обмелению и зарастанию.

Очевидно, что колонка ДО, отобранная в оз. Зеркальном, соответствует не меньшему промежутку времени, чем колонка ДО, отобранная из оз. Большого. Это определяется тем, что длина упомянутых колонок сопоставима, а темпы осадконакопления в озере, где процессы заболачивания отсутствуют, всегда ниже. Отсутствие процессов заболачивания в оз. Зеркальном определяется, в первую очередь, его расположением на открытой и свободной от леса возвышенности. Однако на протяжении всего проанализированного интервала времени (~ 200 лет) в доминирующем комплексе таксонов присутствуют только 1-2 доминирующих таксона (рис. 2). Об этом можно судить по расположению на графике центра локализации результирующих линий. Обычно для обеспечения целостности озерной экосистемы необходимо не менее 2-3 доминирующих таксонов. Это позволяет сделать заключение о большой уязвимости этого малого озера. Малейшее вмешательство извне может «запустить» процесс его эвтрофикации и заболачивания.

Выводы. Анализ таксономической структуры диатомовых комплексов позволил выделить 3 этапа трансформации экосистемы оз. Большое за последние 2 столетия его существования. Первый этап соответствует времени существования на акватории устойчивой озерной экосистемы. Второй и третий этапы трансформации экосистемы озера связаны с процессами заболачивания и зарастания оз. Большого. Эти процессы начались в начале XX столетия и заметно усилились под воздействием антропогенной нагрузки с середины 50-х гг. прошлого века. Усиление темпов зарастания и заболачивания соответствует третьему этапу трансформации экосистемы озера. За тот же промежуток времени экосистема оз. Зеркальное не претерпела заметных трансформаций, однако в отличие от экосистемы оз. Большое она менее устойчива и любое незначительное вмешательство может привести к негативным изменениям. Подавляющее большинство малых бессточных озер и более мелких замкнутых водоемов Сочинского национального парка прошли те же этапы трансформации, что и экосистема оз. Большое, и представлены на сегодняшний день заросшими и заболоченными водоемами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cheddadi, R., Yu. G, Guiot, J., Harrison, S.P., Prentice, C.I. The climate of Europe 6000 years ago // *Climate Dynamics*. 1997. V. 13. Pp. 1-9.
2. Dermody, B.J., Boer, J., de, Bierkens, M.F.P, Weber, S.L., Wassen, M.J., Dekker, S.C. A seesaw in Mediterranean precipitation during the Roman Period linked to millennial-scale changes in the North Atlantic // *Climate of the Past*. 2012. V. 8. Pp. 637-651.
3. Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И. Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // *Доклады Академии наук. Общая биология*. 2009. Т. 429. № 3. С. 274-277.
4. Разумовский Л.В. Оценка трансформации озерных экосистем методом диатомового анализа. М.: Геос, 2012. 200 с.
5. Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. Определитель пресноводных водорослей СССР. Диатомовые водоросли / Ред. А.И. Прошкина-Лавренко. Вып. 4. М.: Советская наука, 1951. 618 с.

6. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли — индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
7. Battarbee, R.W. Diatom analyses // Handbook of Holocene Paleocology and Paleobiology. Chichester: Wiley, 1986. Pp. 531-570.
8. Appleby, P.G., Oldfield, F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment // *Catena* 5. 1978. Pp. 1-8.
9. Appleby, P.G. Sediment records of fallout radionuclides and their application to studies of sediment-water interactions // *Water, Air and Soil Pollution*. 1997. № 99. Pp. 573-586.
10. Разумовский Л.В. Реконструкция температурных циклов и сукцессионных изменений по диатомовым комплексам из донных осадков на примере Галичского озера // *Водные ресурсы*. 2008. Т. 35. № 6. С. 595-608.
11. Разумовский В.Л. Формирование экосистемы карстового озера в степном поясе гор Кавказа (диатомовый анализ) // *Аридные экосистемы*. 2014. № 2. С. 69-73.
12. Разумовский Л.В., Гололобова М.А. Трансформация диатомовых комплексов из озер Борое и Глубокое в конце позднего голоцена // *Вестник Московского государственного университета. Биологическая серия*. 2014. № 1. С. 19-23.

REFERENCES

1. Cheddadi, R., Yu. G, Guiot, J., Harrison, S.P., Prentice, C.I. The climate of Europe 6000 years ago. *Climate Dynamics*. 1997. Vol. 13. Pp. 1-9.
2. Dermody, B.J., Boer, J., de, Bierkens, M.F.P, Weber, S.L., Wassen, M.J., Dekker, S.C. A seesaw in Mediterranean precipitation during the Roman Period linked to millennial-scale changes in the North Atlantic. *Climate of the Past*. 2012. Vol. 8. Pp. 637-651.
3. Razumovsky, L.V., Moiseenko, T.I. Estimation of the spatial-temporal transformations of the lake ecosystems by using the diatom analysis. *Doklady Akademii nauk. Obshchaya biologiya — Reports of the Academy of Sciences. General Biology*. 2009. Vol. 429 (3). Pp. 274-277. (in Russian).
4. Razumovsky, L.V. *Otsenka transformatsii ozernykh ekosistem metodom diatomovogo analiza* [Estimation of lake ecosystem transformation by using the diatom analysis]. Moscow, 2012. 200 p. (in Russian).
5. Zabelina, M.M., Kiselev, I.A., Proshkina-Lavrenko, A.I., Sheshukova, V.S. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR. Diatomovye vodorosli. Vyp. 4* [A taxonomic key to freshwater algae of the USSR. Diatoms. Vol. 4] / Ed. by Proshkina-Lavrenko, A.I. Moscow, 1951. 618 p. (in Russian).
6. Davydova, N.N. *Diatomovye vodorosli — indikatory prirodnnykh uslovii vodoemov v golotsene* [Diatoma as indicators of natural conditions in water reservoirs in Holocene]. Leningrad, 1985. 244 p. (in Russian).
7. Battarbee, R.W. Diatom analyses / A Handbook of Holocene Paleocology and Paleobiology. Chichester: Wiley, 1986. Pp. 531-570.
8. Appleby, P.G., Oldfield, F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena* 5. 1978. Pp. 1-8.
9. Appleby, P.G. Sediment records of fallout radionuclides and their application to studies of sediment-water interactions. *Water, Air and Soil Pollution*. 1997. № 99. Pp. 573-586.
10. Razumovsky, L.V. Reconstruction of temperature cycles and succession changes according to diatom assemblages in the bottom sediment from Lake Galichskoe. *Vodnye resursy — Water Resources*. 2008. Vol. 35 (6). Pp. 595-608. (in Russian).
11. Razumovsky, L.V. Formation of the karst lake ecosystem in the Caucasus steppe zone (a diatom analysis). *Aridnye ekosistemy — Arid ecosystems*. 2014. № 2. Pp. 69-73. (in Russian).
12. Razumovsky, L.V., Gololobova, M.A. Transformation of diatom assemblages in lakes Boroie and Glybokoe in the end of the late Holocene. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologicheskaya seriya — Moscow University Bulletin. Biological series*. 2014. № 1. Pp. 19-23. (in Russian).

Авторы публикации

Разумовский Лев Владимирович — ведущий научный сотрудник Института водных проблем Российской академии наук (Москва), доктор географических наук

Шелехова Татьяна Станиславовна — старший научный сотрудник Института геологии Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск), кандидат географических наук

Разумовский Викентий Львович — аспирант Института водных проблем Российской академии наук (Москва)

Authors of the publication

Lev V. Razumovsky — Dr. Sci. (Geogr.), Leading Researcher, Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences (Moscow)

Tatiana S. Shelekhova — Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk)

Vikenty L. Razumovsky — Post-graduate student, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences (Moscow)