

# ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРЕ ТАЙХУ

Г. Т. Фруммин, Жань-Жань Хуан

Российский государственный гидрометеорологический университет,  
Малоохтинский пр. 98, Санкт-Петербург, 195196 Россия  
e-mail: gfrumin@mail.ru

Поступило в редакцию 11 мая 2012 г.

Рассмотрена динамика содержания в озере Тайху хлорофилла *a* и биогенных элементов (азота общего, фосфора общего, фосфора минерального и кремния) за период с 1985–2011 гг. выявлены значительные тренды увеличения концентраций азота общего и кремния и незначительные тренды увеличения концентраций фосфора общего и фосфора минерального. Зафиксирован тренд увеличения содержания хлорофилла *a*. Установлено, что лимитантом первичной продукции в озере является фосфор. Проведена вероятностная оценка трофического статуса озера.

*Ключевые слова:* озеро Тайху, биогенные элементы, эвтрофирование.

Озеро Тайху – крупное озеро в дельте реки Янцзы, на границе провинций Цзянсу и Чжэцзян (Китай). Географические координаты озера: 31°10'00" с.ш. и 120°09'00" в.д. (рис. 1). Озеро Тайху соединено со знаменитым Великим китайским каналом. В озере берет начало несколько рек, в том числе Сучжоухэ. На озере стоят уникальные известняковые скалы, материал которых используется китайскими умельцами для украшения традиционных китайских садов в регионе. На Тайху около 90 островов, некоторые из них совсем крошечные (всего несколько метров в длину), а некоторые протянулись на несколько километров. Озеро Тайху – третье по величине пресноводное озеро в Китае после Поянху (объем 25.2 км<sup>3</sup>, средняя глубина 8.4 м) и Дунтинху (объем 17.8 км<sup>3</sup>, средняя глубина 6.7 м) (табл. 1). Озеро используется для рыболовства (≈13696 тонн/год), навигации и туризма [1].

Температура воды озера варьирует в широком интервале от минимального значения 2.5°C в январе до максимального 30.2°C в августе. По ориентировочным расчетам плотность населения на водосборе примерно 877 чел/км, что соответствует численности населения 30000000 человек.

Бассейн озера Тайху располагается вблизи дельты реки Янцзы, на территории промышленно развитых приморских провинций Цзянсу и Чжэцзян. Города Исин, Сучжоу, Уси, Цзясин и Хучжоу, составляют основные промышленные и сельскохозяйственные зоны вокруг озера. Промышленные сточные воды, поступающие в озеро, содержат химические соединения текстильной, фармацевтической, металлургической, пищевой и целлюлозно-бумажной отраслей народного хозяйства. Наряду с ними в озеро поступают соединения азота и фосфора, содержащиеся в коммунально-бытовых

**Таблица 1.** Физико-географические характеристики озера Тайху

Характеристика	Величина	Характеристика	Величина
Площадь, км <sup>2</sup>	2427.8	Максимальная глубина, м	2.6
Объем, км <sup>3</sup>	4.3	Средняя глубина, м	1.9
Длина, км	~60	Время полного водообмена, год	0.79
Ширина, км	~45	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	34207.7

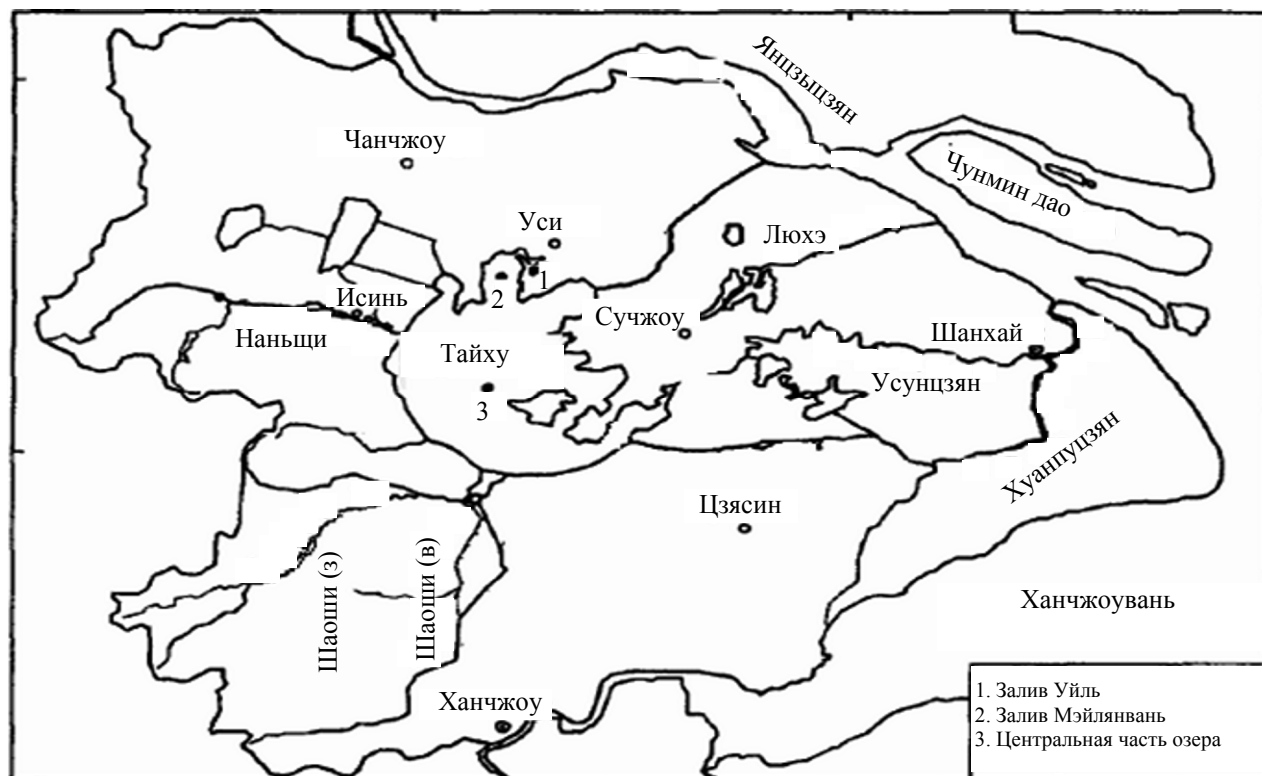


Рис. 1. Схема озера Тайху и его бассейна.

и сельскохозяйственных стоках. В результате, в озере накапливается значительное количество загрязняющих и биогенных веществ. Таким образом, основные экологические проблемы озера Тайху – это токсикофикация и эвтрофикация [2, 3].

Цель исследования заключалась в анализе межгодовой динамики содержания в воде озера биогенных элементов (общего азота – TN, общего фосфора – TP, минерального фосфора – IP и кремния – Si) и хлорофилла *a* (Chl *a*) за период с 1990 по 2011 гг. Первичные данные для анализа были заимствованы из различных литературных источников, в основном из материалов Hydrological Monitoring Center in Wuxi (табл. 2). Эти данные были подвергнуты математико-статистической обработке, результаты которой представлены на рис. 2–6 и в табл. 3.

Как следует из рис. 3–6, за период с 1985 по 2011 гг. по величинам коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) наблюдается значительный тренд увеличения концентраций азота общего и кремния и незначительный тренд увеличения концентраций фосфора общего и фосфора минерального. Для

этого же периода зафиксирован тренд увеличения концентрации хлорофилла *a*.

Согласно работам [4, 5] по соотношению минеральных форм азота ( $N_{\text{мин}}$ ) и фосфора ( $P_{\text{мин}}$ ) можно оценивать лимитирующее влияние азота и фосфора на развитие водорослей. При  $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}} < 10$  лимитантом первичной продукции в водоеме является азот. При  $10 \leq N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}} < 17$  имеет место одновременная лимитация биосинтеза азотом и фосфором. При  $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}} \geq 17$  развитие водорослей лимитируется фосфором.

С учетом изложенного был проведен выборочный анализ указанного соотношения, показавший, что в озере Тайху лимитантом первичной продукции является фосфор, так как во всех рассмотренных случаях соотношение концентраций минеральных форм азота к концентрациям минерального фосфора больше 17 (рис. 7).

Для оценки трофического статуса озера Тайху было использовано усредненное за период с 1985 по 2011 гг. содержание хлорофилла *a* (26.2 мкг л<sup>-1</sup>). Выбор хлорофилла *a* обусловлен следующими

**Таблица 2.** Межгодовая динамика содержания биогенных элементов в озере Тайху

Год	Chl <i>a</i> , мкг/л	TN, мкг/л	TP, мкг/л	Si, мкг/л	IP, мкг/л
1985	19.5	653	26	499	19
1986	19.0	898	31	354	24
1987	22.6	1574	29	627	22
1988	23.5	1106	44	514	29
1989	20.0	1340	47	554	33
1990	34.1	2419	62	617	45
1991	18.2	1406	70	561	74
1992	19.6	1658	71	444	54
1993	23.5	1963	117	372	78
1994	29.6	2257	62	573	41
1995	20.4	2438	82	452	61
1996	24.1	2796	92	589	68
1997	23.7	2953	107	961	80
1998	27.2	2387	101	952	143
1999	22.6	2193	86	1081	95
2000	35.6	2699	123	986	101
2001	31.7	2471	105	955	71
2002	24.8	2733	79	1097	59
2003	19.9	2947	73	1514	55
2004	29.9	3008	82	2065	62
2005	21.3	3964	79	1214	57
2006	37.7	4980	95	1521	72
2007	36.7	5229	150	1927	114
2008	36.0	3692	74	1568	56
2009	33.3	3312	57	1539	45
2010	28.7	2856	44	1181	32
2011	24.6	2204	50	967	33

соображениями. Хлорофилл *a* является основным фотосинтетическим пигментом, поэтому измеренное значение его концентрации в пробе воды является репрезентативным индикатором биомассы водорослей. Хлорофилл *a* является полезной и точной мерой эвтрофирования водоемов и поэтому регулярно используется при

измерениях «откликов» водоемов на биогенную нагрузку с целью их восстановления [6].

В данном исследовании для оценки трофического статуса озера Тайху был использован вероятностный подход, ранее разработанный ОЭРК, и базирующийся на данных

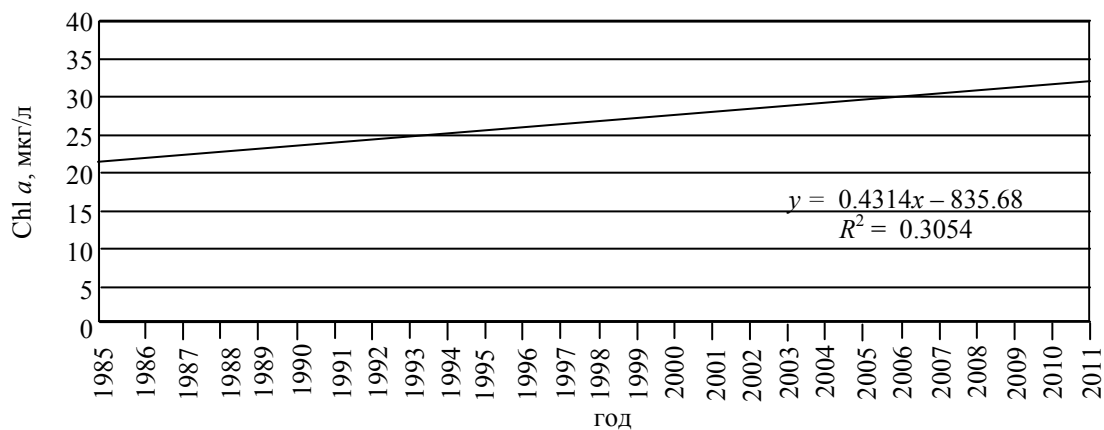
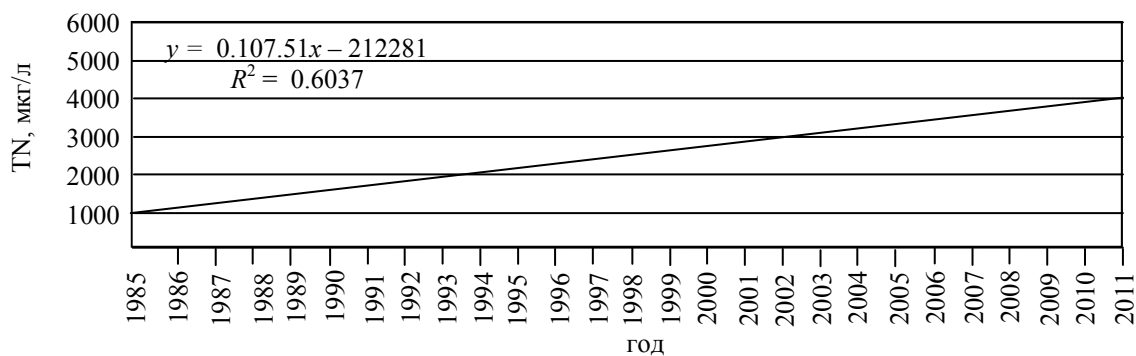
Рис. 2. Динамика межгодовых концентраций хлорофилла *a* в озере Тайху.

Рис. 3. Динамика межгодовых концентраций азота общего в озере Тайху.

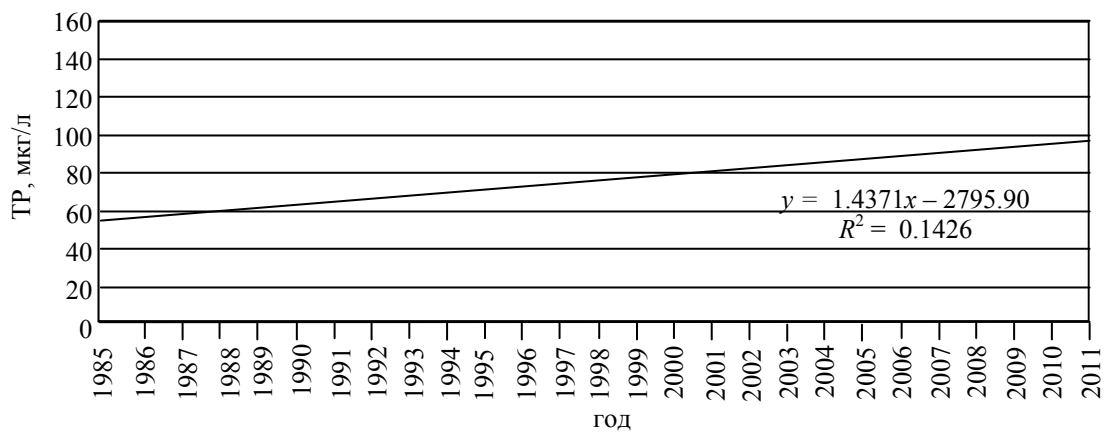


Рис. 4. Динамика межгодовых концентраций фосфора общего в озере Тайху.

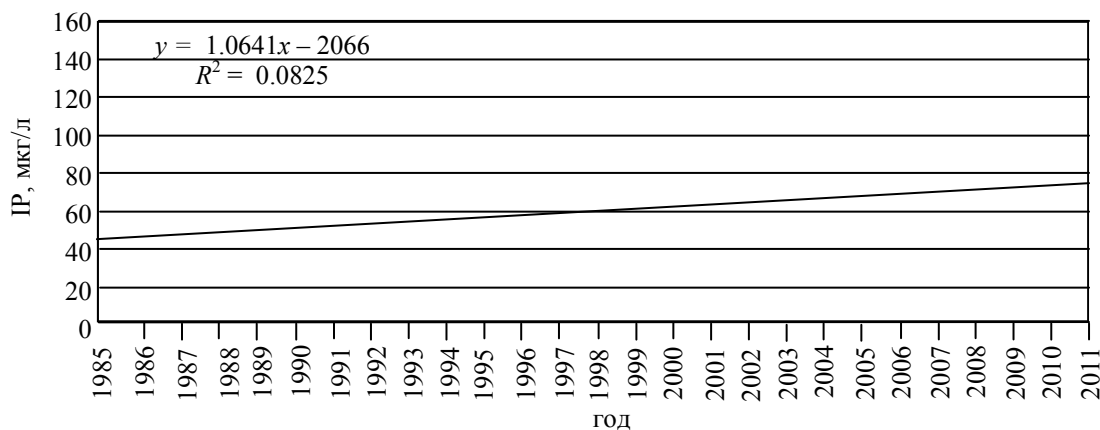


Рис. 5. Динамика межгодовых концентраций фосфора минерального в озере Тайху.

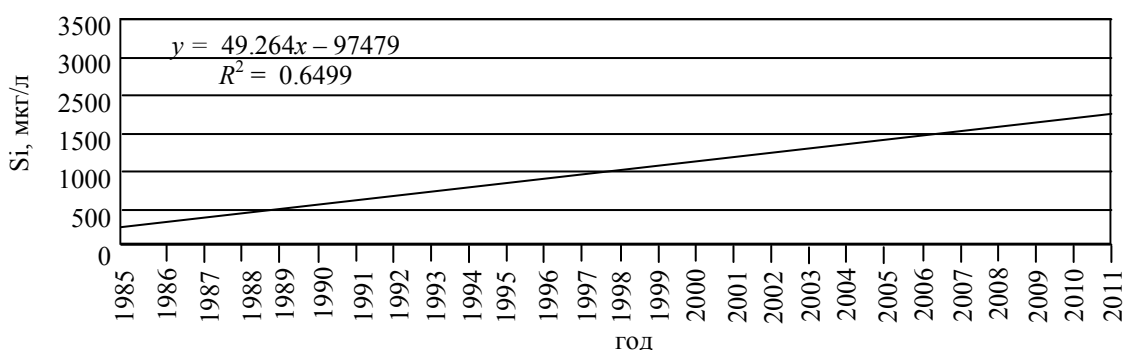


Рис. 6. Динамика межгодовых концентраций кремния в озере Тайху.

о содержании хлорофилла *a* в водной массе. Для оценки уровня трофности были использованы пять градаций:  $\mu_{УО}$  – вероятность ультраолиготрофного состояния,  $\mu_{О}$  – вероятность олиготрофного состояния,  $\mu_{М}$  – вероятность мезотрофного состояния,  $\mu_{Э}$  – вероятность эвтрофного состояния и  $\mu_{ГТ}$  – вероятность гипертрофного состояния. Вероятностные кривые, приводимые в литературе [6], были аппроксимированы аналитическими зависимостями (табл. 4). Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Как следует из приведенных данных, озеро Тайху на 4% может быть охарактеризовано как мезотрофное, на 47% – как эвтрофное и на 49% – как гипертрофное.

Для деэвтрофирования озера Тайху и перехода его в олиготрофное состояние необходимо существенно снизить антропогенную фосфорную нагрузку. Согласно работе [7], критическая фосфорная нагрузка на озеро не должна превышать 89 тонн/год.

Таблица 3. Среднее содержание хлорофилла *a* и биогенных элементов в озере Тайху за период с 1985 по 2011 гг.

Ингредиент	Средняя концентрация (доверительный интервал), мкг/л
Хлорофилл <i>a</i> (Chl <i>a</i> )	26.2(23.7–28.7)
Азот общий (TN)	2524(2089–2959)
Фосфор общий (TP)	75(63–87)
Фосфор минеральный (IP)	60(48–72)
Кремний (Si)	951(759–1143)

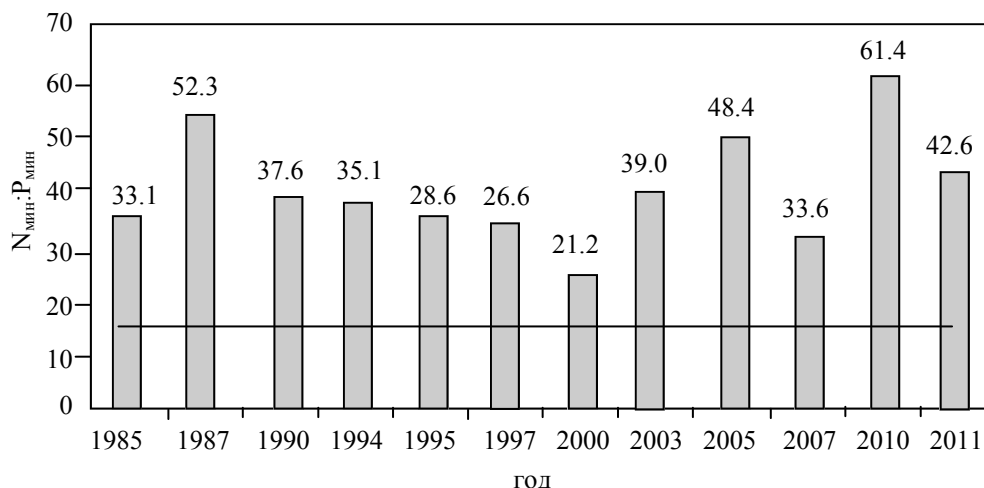


Рис. 7. Соотношение минеральных форм азота и фосфора в озере Тайху.

Значительное увеличение массива сине-зеленых водорослей в озере Тайху с апреля 2007 года вызвало массовый падеж рыбы и ухудшение качества питьевой воды. Для выправления ситуации местные правительства приняли ряд мер, в том числе закрытие прибрежных промышленных предприятий и увеличение поголовья рыбы в озере. С 2009 г. прибрежные города Сучжоу, Уси, Чанчжоу и Хучжоу совместно инициировали проведение Праздника выпуска рыбы. Более 20 миллионов мальков рыбы разных пород запланировано для выпуска в озеро Тайху для борьбы с сине-зелеными водорослями, поставив-

шими водоем на грань выживания. В попытках навести порядок в озере, власти начали использовать рыбу. Они выпустили в водоём 10 миллионов зелёного и серебряного карпа после того, как водоросли лишили питьевой воды миллионов местных жителей. По заявлению Комитета по управлению рыболовством на озере Тайху, следующий шаг – «поселить» в озере 20 миллионов рыб, питающихся водорослями, Общая стоимость кампании, финансируемой за счёт правительства и общественных пожертвований, составляет 8.6 миллионов юаней (1.3 миллиона долларов). Серебряный карп на протяжении жизни может потребить до 50 кг водорослей и другого планктона, при этом набирая в весе всего 1 кг. Миллионы рыб, питающихся водорослями, уже использовались для очистки Тайху и других озёр. Это привело к улучшениям в рыбной промышленности, несмотря на озабоченность населения по поводу потребления в пищу рыбы, которая «пировала» токсичными продуктами.

Таблица 4. Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса

Трофический статус	Аналитическое выражение
Ультраолиготрофный	$\mu(x) = 1 - e^{-e^{\frac{[-x^{0.9} + (0.7)^{0.9}]}{(0.4)^{0.9}}}}$
Олиготрофный	$\mu(x) = 0.62 - e^{-\left(\frac{\ln x - \ln 1.5}{\ln 1.5 - \ln 43}\right)^2}$
Мезотрофный	$\mu(x) = 0.62 - e^{-\left(\frac{\ln x - \ln 4.7}{\ln 4.5 - \ln 15}\right)^2}$
Эвтрофный	$\mu(x) = 0.62 - e^{-\left(\frac{\ln x - \ln 15}{\ln 15 - \ln 43}\right)^2}$
Гипертрофный	$\mu(x) = -e^{-e^{\frac{[-x^{0.5} + (21)^{0.5}]}{(2.4)^{0.5}}}}$

Таблица 5. Вероятностная оценка трофического статуса озера Тайху по среднему содержанию хлорофилла *a* за период 1985-2011 гг.

Трофический статус	Вероятность, %
Мезотрофный	4
Эвтрофный	47
Гипертрофный	49

## ЛИТЕРАТУРА

1. Xiangcan, J., *Lakes in China – Research of Their Environment*, China Ocean Press, 1995, 585 p.
2. Хуан, Ж.-Ж., Фруммин, Г.Т., *Ученые записки РГГМУ*, 2011, № 19, 2011, с. 14.
3. Фруммин, Г.Т., Хуан, Ж.-Ж., *Ученые записки РГГМУ*, 2011, № 21, с. 32.
4. Forsberg, C., *Z. Wasser- und Abwasser Forsch.*, 1979, vol. 2, no. 2.
5. Дмитриев, В.В., *Диагностика и моделирование водных экосистем*, СПб.: СПбГУ, 1995.
6. Хендерсон-Селлерс, Б., Маркленд, Х.Р., *Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования*, Л.: Гидрометеиздат, 1990.
7. Фруммин, Г.Т., Хуан, Ж.-Ж., *Экологическая химия*, 2011, т. 20, № 1, с. 11.

## Dynamics of the Contents of Nutrients in Lake Taihu

G. T. Frumin and Zhan-Zhan Khuan

*Russian State Hydrometeorological University, Malookhtinskii pr. 98, St. Petersburg, 195196 Russia  
e-mail: gfrumin@mail.ru*

**Abstract**—The purpose of research consist in the analysis of dynamics of concentrations of chloropyll *a* and nutrients (total nitrogen, total phosphorus, mineral phosphorus, silicon) in Taihu lake from 1985 to 2011. Trends of increase in concentration of a chlorophyll *a* and nutrients are revealed. Probability distribution curves for the average lake total phosphorus was approximated by analytical expressions. The estimation of the trophic status of lake for the above-mentioned period was carried out.

*Key words:* Lake Taihu, nutrients, eutrophication.