

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
(РГГМУ)

На правах рукописи

УДК [556.555.2:551.583(282.263.5)]

Гетахун Брук Абат

Уровенный режим озер северо-восточной Африки как  
интегральный показатель изменения климата

Специальность 25.00.27 - гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург  
2008

Диссертация выполнена на кафедре гидрологии суши Российского государственного гидрометеорологического университета.

Научный руководитель:

- доктор географических наук, профессор,  
Догановский Аркадий Михайлович
- доктор географических наук, профессор  
Мякишева Наталия Вячеславовна

Официальные оппоненты:

- доктор географических наук  
Бабкин Алексей Владимирович
- кандидат технических наук  
Трушевский Виктор Леонидович

Ведущая организация:

Институт озероведения РАН

Защита диссертации состоится «25 » 12 2008 г. В 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 444-41-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

Автореферат разослан « 25 » 11 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук

В.Н. Воробьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Климат не остается постоянным с течением времени, а испытывает изменения. Изменяются основные его элементы: температура воздуха, атмосферные осадки, ветер, влажность и т.д. Различают геологические, исторические и современные изменения климата. Современные изменения климата - один из важнейших факторов социально-экономического развития стран мира. Поэтому изучение изменений климата, а также исследование возможности их предсказания - задача исключительно важная. От изменений климата зависит не только состояние водных ресурсов планеты, но и закономерности их изменений в ближайшем будущем. Все сказанное особенно важно для стран северо-восточной Африки, где наблюдается дефицит воды.

Озера - водные объекты с замедленным водообменом. Уровень воды в них не только фиксирует водные ресурсы, но и является интегральным показателем увлажненности территорий, а, следовательно, и интегральным показателем изменений климата. Замедленный водообмен в озерах во многом определяет структуру рядов уровней воды, формируя в первую очередь высокую инерционность колебаний, которая проявляется в наличии трендов - низкочастотных составляющих. Поэтому достаточно длинные ряды наблюдений над уровнями воды в озерах позволяют более надежно, чем ряды атмосферных осадков, температуры воздуха и речного стока выявить тренды и оценить тенденции изменений климата. Поскольку режим озер формируется не только под воздействием активных (климатических), но и адаптивных (подстилающая поверхность) факторов, актуальным является и изучение морфометрических особенностей озер и их бассейнов.

### Цели и задачи работы

Основная цель работы состоит в изучении уровня режима разнотипных озер северо-восточной Африки на основе уравнения водного баланса и установлении связи между изменениями климата и колебаниями уровня воды в озерах.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. исследовать формы озерных котловин, влияющих на уровень режим;
2. определить составляющие водного баланса озер и провести их увязку;
3. выявить особенности распределения разнотипных озер по территории;
4. рассчитать ряды уровней колебаний озер на основе уравнения водного баланса и сопоставить их с натурными данными;
5. выявить характер многолетних колебаний уровня воды в озерах разных типов водообмена;
6. оценить тенденции в изменениях уровня озер;
7. установить закономерности изменений климата на рассматриваемой территории;
8. разработать способ восстановления ряда годовых значений уровня озера Тана;
9. определить связь уровней озер с изменениями климата;
10. оценить возможность экстраполяции уровня озера Тана на ближайшее будущее.

**Исходные данные.** Для решения поставленных задачи использовались следующие данные:

- наблюдения за уровнем воды, речным стоком на впадающих и вытекающих реках для четырех озер: Тана, Аваса, Зивай, и Абайа;
- наблюдения за температурой воздуха, атмосферными осадками, скоростью ветра, влажностью и солнечным сиянием для бассейнов перечисленных озер;
- наблюдения за расходами р. Нил у Асуана и у Донгола, р. Голубой Нил у Хартума и р. Белый Нил у Малакаль и Дангала;
- данные батиметрических съемок для шести озер: Тана, Шала, Аваса, Лангано, Абийата, и Зивай.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались следующие методы:

1. метод аналогии;
2. метод водного баланса;
3. метод корреляционно-спектрального анализа;
4. метод регрессии и авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС).

**На защиту выносятся:**

1. особенности строения озерных котловин северо-восточной Африки;
2. закономерности формирования водного баланса и уровня режима озер;
3. закономерности распределения озер разных типов водообмена по территории;
4. характер многолетних колебаний и тенденций в изменениях уровня озер в естественных и нарушенных условиях;
5. закономерности изменений климата на территории северо-восточной Африки;
6. особенности взаимосвязи между колебаниями уровня озер и изменениями климата;
7. возможность восстановления и экстраполяции уровня озера Тана с учетом изменений климата.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. впервые проведена оценка форма котловин озер северо-восточной Африки на основе расчетных параметров;
2. впервые оценены условия формирования урвненного режима озер разных типов водообмена на основе уравнения водного баланса;
3. впервые выявлены и оценены полициклические колебания и тенденции в изменениях уровня озер в естественных и нарушенных условиях;
4. впервые выполнено районирование и картирование рассматриваемой территории по характеру распределение разнотипных озер;
5. впервые установлены закономерности изменений климата северо-восточной Африки на основе анализа индексов увлажненности;
6. впервые разработан способ восстановления продолжительного ряда годовых уровней озера Тана по ряду расходов реки Нил;
7. впервые установлена связь между колебаниями уровня озер и изменениями климата;
8. впервые на основе вероятностных моделей выполнена экстраполяция уровня озера Тана на ближайшее будущее.

**Достоверность результатов работы** обоснована:

1. использованием большого объема данных Национального Метеорологического Агентства и Министерства Водных Ресурсов Эфиопии, а также базы данных ЮНЕСКО;
2. применением метода водного баланса;
3. использованием современных статистических методов анализа, обобщения и экстраполяции временных рядов.

### **Практическое значение работы**

Результаты работы могут быть внедрены в оперативную службу водных ресурсов стран северо-восточной Африки. Результаты работы также могут быть использованы в учебном процессе при преподавании таких дисциплин как гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия, а также дисциплины рациональное использование и охрана водных объектов. Результаты работы могут быть полезны и при выполнении научных проектов в области гидрометеорологических и экологических исследований.

### **Апробация результатов**

Наиболее значимые результаты диссертации докладывались на двенадцатой Мировой Озерной Конференции (The 12<sup>th</sup> World Lake Conference: Taal 2007, Oct.28 - Nov. 2, Jaipur, India), итоговых сессиях Ученого совета РГГМУ (2007, 2008 гг.), а также на кафедре гидрологии суши РГГМУ (2008г). По теме диссертации опубликованы 4 работы, две из них на английском языке, две в журнале ВАК.

**Личный вклад автора:** сбор данных, проведение расчетов, интерпретация полученных результатов применительно к решению поставленных задач.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложений и списка использованных источников, включающего 70 наименования. Общий объем работы составляет 148 страниц, включая 71 рисунок и 15 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации; сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, а также отражена новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** «Физико-географическое описание» приведены общие сведения о местоположении Эфиопии и соседних стран северо-восточной Африки, описан климат и подстилающая поверхность. Также даны общие сведения об озерах рассматриваемой территории, их происхождении, распределении, состоянии изученности и хозяйственном использовании. Так, территория Эфиопии в целом относится к зоне с тропическим климатом. Однако сложный рельеф местности с высотами от 116м ниже уровня моря до 4620м выше уровня моря, а также различная экспозиция склонов гор приводят к большому разнообразию климатических условий.

Климат территории формируется главным образом под влиянием движения внутритропической зоны конвергенции (ВЗК). Перенос влагонесущих воздушных масс и сложный рельеф приводят к большому разбросу величин атмосферных осадков и разнообразию их режима. Наиболее увлажненным является район с осадками более 2000мм в год, наименее увлажненным - район с осадками около 100мм в год. Средняя температура воздуха изменяется от 12°С до 25°С.

На территории Эфиопии сосредоточено большое количество разнотипных озер. Из них 13 озер достаточно хорошо изучены и имеют большое хозяйственное значение. Площадь этих озер изменяется от 20 до 3600 км<sup>2</sup>. Самое большое озеро страны- Тана, из него вытекает река Голубой Нил. Озеро расположено на

высоте 1785м, его котловина имеет тектоническое происхождение, а объем заключенной в ней воды составляет 32,4 км<sup>3</sup>. Большинство перечисленных озер имеют котловины тектонического происхождения. Однако в Эфиопии есть озера с котловинами вулканического происхождения, например, озеро Шала с максимальной глубиной 266м.

Все перечисленные озера широко используются в хозяйственных целях и, прежде всего, для водоснабжения, рыбопродукции, ирригации, рекреации и как пути сообщения.

**В второй главе** «Озерный фонд территории» рассмотрены особенности формирования и закономерности строения озерных котловин Эфиопии. Формы котловин и их характеристики во многом определяют структуру водного баланса озер, влияя в первую очередь на испарение и сток. Так, для озер с широкими котловинами испарение с поверхности зеркала выше, чем для озер с узкими котловинами. Поскольку сток из озера зависит от его уровня, а уровень в свою очередь во многом определяется формой озерных котловин, то косвенно характеристики котловин влияют на приращения уровня.

Для изучения особенностей формирования и установления закономерностей строения озерных котловин рассматриваются шесть озер: Тана, Зивай, Абиата, Шала, Лангано, и Аваса. Их батиметрические карты были выбраны из различных источников. Длины изобат измерялись с помощью курвиметра, а площади между изобатами - с использованием планиметра. Также по картам изобат измерялись максимальные длина и ширина озер. Остальные морфометрические характеристики рассчитывались.

При изучении закономерностей строения озерных котловин принята гипотеза о том, что котловины одного и того же происхождения и примерно одинакового периода эволюции имеют приблизительно одинаковые относительные размеры. Эту гипотезу подтверждает график зависимости объема воды в озерах от их площадей  $w = f(F)$ . График зависимости формы котловин от высоты местности  $\Phi = f(Z)$  показал, что при увеличении  $Z$  в горных районах форма котловин приближается к конусу; а при уменьшении  $Z$  - стремится к плоскому цилиндру. Анализ графика зависимости коэффициента развития береговой линии от высоты местности  $m = f(Z)$ , имеющий практически линейный характер, позволяет сделать вывод о том, что с увеличением  $Z$  увеличивается и  $m$ .

Проведенные исследования показали, что на территории северо-восточной Африки наблюдаются озера с разной формой котловин: близкой к параболической (Тана и Зивай), близкой к полушару (Абиата и Аваса) и близкой к плоскому цилиндру (Лангано и Шала).

**В третьей главе** «Водный баланс разнотипных озер» рассмотрены закономерности формирования водного баланса и уровня режима озер, а также приведены особенности их распределения по территории. Изменение объема воды в озере за малый промежуток времени описывается уравнением

$$W(t + \Delta t) - W(t) = R(t)\Delta t + F_o(t)P(t)\Delta t - F_o(t)E(t)\Delta t - R_o(t)\Delta t, \quad (1)$$

где  $R$ - речной приток, включая подземную составляющую (м<sup>3</sup>/с);  $P$ - слой осадков, выпадающих на поверхность озера в единицу времени (мм);  $R_o$ - сток из озера (м<sup>3</sup>/с);  $E$  - слой испарения с поверхности озера в единицу времени (мм);  $F_o$ - площадь зеркала озера (км<sup>2</sup>).

После алгебраических преобразований при  $\Delta t \rightarrow 0$  получим:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \{ R(t) + F_o [ P(t) - E(t) ] - R_o(t) \} / F_o. \quad (2)$$

Обозначив суммарное поступление воды в озеро через

$$R_n = R(t) + F_o [ P(t) - E(t) ], \quad (3)$$

и, приняв в качестве линейного приближения

$$R_o(t) = a h(t) + b, \quad (4)$$

уравнение (2) перепишем в виде

$$\frac{dh(t)}{dt} + a \frac{1}{F_o} h(t) = \frac{1}{F_o} [ R_n(t) - b ], \quad (5)$$

$$\frac{dR_n(t)}{dt} + gR_n(t) = n(t), \quad (6)$$

где  $n(t)$  - белый шум.

Система уравнений (5) и (6) эквивалентна дифференциальному уравнению второго порядка

$$\frac{d^2 h(t)}{dt^2} + (a + g) \frac{dh(t)}{dt} + ag h(t) = h(t), \quad (7)$$

где  $\eta(t) = n(t)/F_o$ .

Дискретное уравнение водного баланса для озер имеет следующий вид:

$$R + P - R_o - E = \pm \Delta H \quad (8)$$

где  $R$  - суммарный приток с изученных ( $R_i$ ) и неизученных частей ( $R_{ni}$ ) бассейна (мм);  $P$  - атмосферные

осадки на водную поверхность озера (мм);  $R_o$  - сток (мм);  $E$  - испарение с водной поверхности озера (мм);  $\Delta H$  – приращение уровня в озере (мм).

**Приток с изученной части бассейна ( $R_i$ )** - оценен с использованием данных наблюдений за расходами воды на впадающих реках. Определение **притока с неизученной части бассейна ( $R_{ui}$ )** выполнено по данным о модуле стока изученных рек, с использованием метода аналогии. Этот метод основан на построении зависимости модуля стока( $q$ ) от высоты местности над уровнем моря ( $Z$ ), то есть  $q = f(Z)$ . Как видно из рис.1, существует большая разница между модулями стока на различных высотах. Расчеты показали, что значение  $R_{ui}$  для озера Тана равно  $7.4 \text{ л/(с}\cdot\text{км}^2)$  (рис. 1а). Зависимость  $q = f(Z)$  для других озер несколько отличается от зависимости для озера Тана (рис. 1б). Значения  $R_{ui}$  для Абайа, Ауаса, Зиуай равны соответственно  $1.65 \text{ л/(с}\cdot\text{км}^2)$ ,  $2.79 \text{ л/(с}\cdot\text{км}^2)$  и  $1.25 \text{ л/(с}\cdot\text{км}^2)$ .

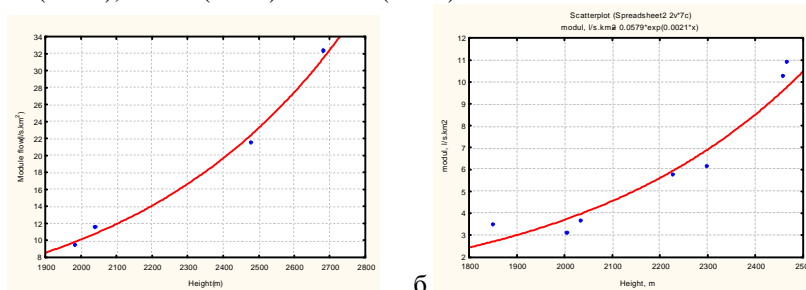


Рис. 1 Зависимость  $q = f(Z)$ : а) для озера Тана б) для других озер

**Среднее количество осадков на водную поверхность озера ( $P$ )** - определено по данным метеорологических станций, расположенных в непосредственной близости к озеру, имеющих самый длинный период наблюдений. Например, для озера Тана - это станции Бахирдар, Кунзила, Горгора и Ворета. Считается, что данные, полученные на этих станциях, могут характеризовать количество осадков на водную поверхность озера. Расчетное среднее количество осадков на поверхность озера оценено с использованием метода Тиссена. Для этого построены треугольники и определены их центры тяжести:

$$P = \frac{P_1 f_1 + P_2 f_2 + P_3 f_3 + P_4 f_4}{F_0}, \quad (9)$$

где  $P$  - среднее количество осадков,  $P_1 \dots P_4$  - осадки на каждой станции,  $f_1 \dots f_4$  - доля площади от общей,  $F_0$  - площадь водной поверхности озера.

**Поверхностный сток из озера Тана ( $R_o$ )** проходит по реке Абай (Глубой Нил). Эта река хорошо изучена. Поэтому, сток из озера рассчитан с высокой точностью. Для озера Зиуай сток определен по вытекающей реке Керерсту. Поверхностный сток из озер Ауаса и Абайа отсутствует. Однако для озера Ауаса имеются данные о подземном стоке которые и использованы в уравнении его водного баланса.

**Испарение с поверхности озер ( $E$ )** - один из важных компонентов водного баланса. Однако отсутствие продолжительных ежегодных наблюдений за испарением заставляет определять  $E$  расчетными методами. Измеренные данные по испарению имеются лишь за три года, которые использовались как контрольные. Испарение было оценено по методу Пенмана.

Метод Пенмана основан на привлечении данных по температуре воздуха, скорости ветра, радиационному балансу, влажности. Расчетная формула имеет вид:

$$E = \left( \frac{\Delta}{\Delta + g} \right) E_r + \left( \frac{g}{\Delta + g} \right) E_a \quad [\text{мм/сутки}] \quad (10)$$

$$\text{где } \Delta = \frac{4098 e_{sa}}{(237.3 + T)^2} (\text{Па}/^\circ\text{C}) \quad \& \quad g = 66.8 (\text{Па}/^\circ\text{C}),$$

$$E_r = 0.035 R_n, \quad R_n = \text{радиационный баланс (w/м}^2),$$

$$E_a = \frac{0.102 u}{\ln \left[ \frac{Z_2}{Z_0} \right]^2} (e_{sa} - e_a), \quad u = \text{скорость ветра измеренная на высоте } z_{2,u},$$

$z_0$  зависит от поверхности ( $z_0 = 0.01 - 0.06$  для поверхности воды).

Результаты расчета водного баланса для четырех озер приведены в таблице 1.

Таблица 1: Средние многолетние составляющие водного баланса озер Эфиопии

Озера	Приток (мм)	Осадки (мм)	Сток (мм)	Испарение (мм)	$\Delta H$ (мм)
Тана	1340	1240	1070	1510	-3.28
Абайа	1080	730	-	1700	7.08
Зиуай	1530	750	570	1720	15
Ауаса	1440	950	570*	1440	53.4

\* подземный сток

Абсолютная возможная ошибка расчета составляющих водного баланса равна:

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2} \quad (11)$$

где:  $\sigma_1$  - ошибка определения притока с изученной части бассейна;  
 $\sigma_2$  - ошибка определения притока с неизученной части бассейна;  
 $\sigma_3$  - ошибка определения измерения стока из озера;  
 $\sigma_4$  - ошибка измерения уровня.

Также рассчитывались относительные ошибки ( $\delta$ ), которые были получены как отношение ошибки вычисления составляющая водного баланса к его приходной части. Согласно нормам, принятым в России, считается, что водный баланс оценен с достаточной точностью, если значение  $\delta$  меньше или равно значению  $\sigma$ . Для рассмотренных озер все ошибки находятся в пределах точности расчета, поскольку для озера Тана  $\delta = 3\%$ , а  $\sigma = 10\%$ ; для озера Ауаса  $\delta = 11\%$ , а  $\sigma = 11\%$ ; для озера Зиуай  $\delta = 3\%$ , а  $\sigma = 7\%$ , и для озера Абайа  $\delta = 5\%$ , а  $\sigma = 8\%$ .

**Распределение типов озер по территории** можно установить, решая уравнение водного баланса в объемах, имеющий вид:  $W_i + PF_o - EF_o - W_o = \Delta HF_o$ , при  $\Delta H = 0$ , где  $W_i$  – приток ( $\text{км}^3$ ) и  $W_o$  – сток ( $\text{км}^3$ ). Составляющие в этом уравнении могут быть выражены в мм:

$$R \frac{F_{\text{вдсб}}}{F_o} + P - E - \frac{W_o}{F_o} = 0, \quad (12)$$

где  $F_{\text{вдсб}}$  - площадь бассейна ( $\text{км}^2$ )  
 $F_o$  - площадь водной поверхности озера ( $\text{км}^2$ )

Для бессточного озера член  $W_o/F_o$  в полученном уравнении должен быть равен нулю. Поэтому, уравнение (12) примет вид:

$$R \frac{F_{\text{вдсб}}}{F_o} + P - E = 0. \quad (13)$$

Поскольку отношение  $F_{\text{вдсб}}/F_o$  характеризует критический удельный водосбор  $K$ , то уравнение (13) преобразуется следующим образом:

$$RK + P - E = 0. \quad (14)$$

Решая уравнение (14) относительно  $K$ , получим:

$$K = \frac{E - P}{R}. \quad (15)$$

Из уравнения (15) следует, что при  $K > (E-P)/R$  - озеро является сточным, при  $K < (E-P)/R$  - озеро становится бессточным и при  $K = (E-P)/R$  - периодически сточным.

Величины  $E$ ,  $P$ ,  $R$  - имеют зональное распределение, поэтому и параметр  $K$  является зональной величиной. Следовательно, можно построить карту изменений параметра  $K$  по территории (рис. 2). Изолинии на рисунке соединяют точки с равными значениями критического удельного водосбора  $K$ . Анализ карты показывает, что на территории Эфиопии встречаются все типы озер: сточные, бессточные и периодически сточные.

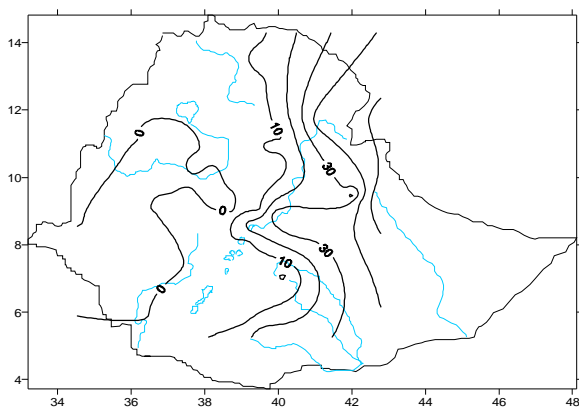


Рис. 2 Распределение параметра К по территории Эфиопии

Например, для озера Тана расчетное значение К равно 4.25, а значение, снятое с карты составляет около 1.5. Следовательно, озеро Тана можно считать сточным, что и наблюдается по расчетным данным. Все озера, расположенные на территории, ограниченной нулевой изолинией должны быть сточными. При продвижении на восток озера становятся бессточными.

**В четвертой главе** «Уровенный режим озер» рассмотрены закономерности формирования уровня озер, особенности его многолетних колебаний и тенденций.

Уровень озера представляет собой интегральную кривую, построенную по данным годовых приращений:

$$H = \int_1^n H_{cp} dh \quad (16)$$

где Н – расчетный уровень,  $H_{cp}$  - средний уровень озера, dh – приращения уровня, n - число рассматриваемых лет. В качестве примера результаты расчетов уровня воды по уравнению водного баланса для озера Тана представлены на рис. 3. Также на рисунке приведены и измеренные значения уровня, которые хорошо согласуются с расчетными величинами.

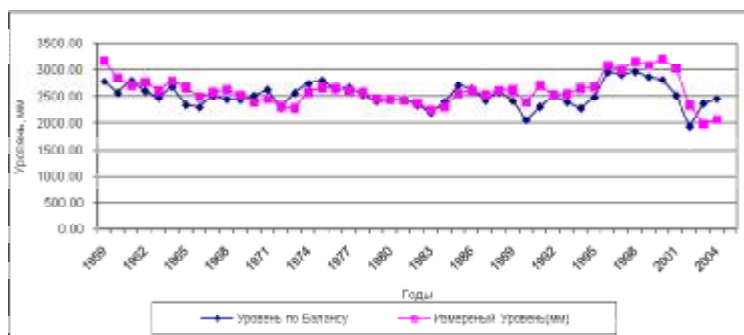


Рис. 3 График колебаний годовых уровней озера Тана

На рис. 4 приведена оценка спектральной плотности  $S^*(\omega)$ , рассчитанная по ряду измеренных значений уровня воды озера Тана, продолжительность которого составляет всего 47 лет. Как видно  $S^*(\omega)$  имеет вид красного шума, на фоне которого наиболее четко выражен всплеск энергии на частоте  $\omega = 0.06$ , соответствующей 11-летнему колебанию.

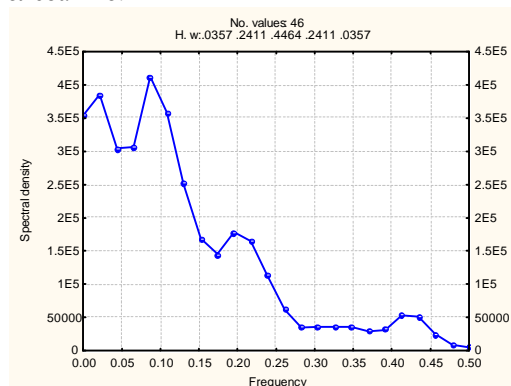


Рис. 4 Спектральный анализ годовых уровней озера Тана



Результаты низкочастотной фильтрации ряда измеренных уровней воды озера Тана (рис. 5) позволяют выделить периоды локальной нестационарности, проявляющиеся как тренды, которые можно рассматривать как ветви подъема или спада циклов более высокого порядка.

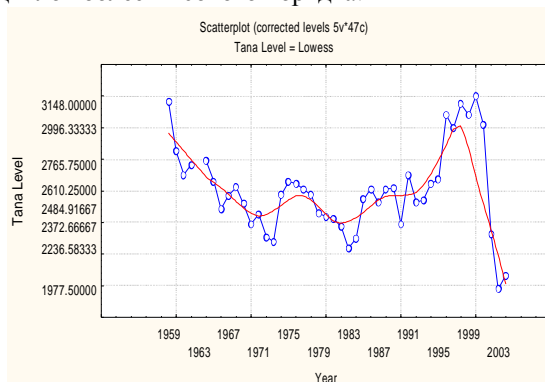


Рис. 5 Полициклические колебания уровня озера Тана

**В пятой главе** «Климат и озера» оцениваются изменения климата и рассматриваются закономерности взаимосвязи между изменениями климата и колебаниями уровня озер северо-восточной Африки, как интегрального показателя изменения климата.

Для характеристики изменения климата региона рассчитываются индексы увлажненности бассейнов озер Тана, Зивай, Аваса, Абайа. Индексы представляют собой отношение суммы осадков за год к средней годовой температуре воздуха  $\gamma = P/t^{\circ}$ . В качестве примера на рис 6а приведен график многолетних колебаний индекса увлажненности  $\gamma$  бассейна озера Тана, а на рисунке 6б - зависимость высоты уровня озера Тана  $H$  от индекса увлажненности  $\gamma$ . Коэффициент корреляции  $r$  между  $H$  и  $\gamma$  достигает 0.70, что подтверждает тесную взаимосвязь между колебаниями уровня и изменениями климата.

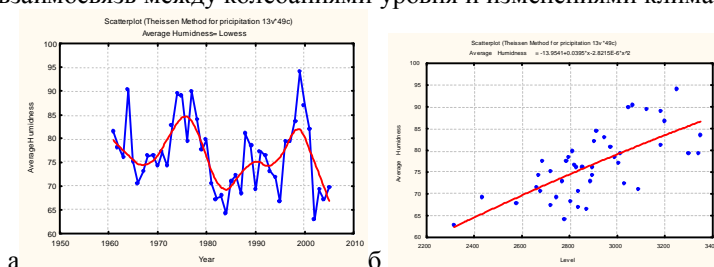


Рис. 6 Коэффициент увлажненности  $\gamma$  в бассейне озеро Тана а) колебания  $\gamma$  б) зависимости  $H=f(\gamma)$  ( $r=0.70$ )

Поскольку продолжительность рядов наблюдений над уровнями воды в озерах северо-восточной Африки незначительна (31-47 лет), возникает необходимость их восстановления. Для этого используется метод аналогии. В качестве аналогов выбраны реки Нил и Голубой Нил. В таблице 2 представлены коэффициенты корреляции между расходами воды, измеренными на разных постах бассейна Нила. При этом пост Донгола расположен недалеко от Асуана на Ниле, а Малакель и Монгола на Белом Ниле выше впадения Голубого Нила. Из таблицы следует, что высокие коэффициенты корреляции наблюдаются между расходами воды на одной реке и на близко расположенных постах, а низкие коэффициенты корреляции - между расходами на разных реках. На реке Нил имеется пост с длинным рядом наблюдений в Асуане (Египет) (с 1871 по 1981), а на реке Голубой Нил - у поста Хартум (с 1912 по 1997).

Таблица 2 Матрица коэффициентов корреляции между расходами воды на реках северо-восточной Африки

	Асуан	Донгола	Гол.Н.	Мал.	Монгола
Асуан(Нил)	1.00	0.93	0.86	0.54	0.49
Донгола(Нил)	0.93	1.00	0.94	0.49	0.40
Голубой Нил	0.86	0.94	1.00	0.32	0.28
Малакаль(Белый Нил)	0.54	0.49	0.32	1.00	0.88
Монгола (Белый Нил)	0.49	0.40	0.28	0.88	1.00

Предварительно до 1871 г. по расходам реки Нил у Асуана восстанавливался ряд расходов на р. Голубой Нил (рис 7), вытекающей из озера Тана, и хорошо отражающей режим его уровней колебаний. Затем по ряду расходов на реке Голубой Нил восстанавливался ряд уровней воды в озере Тана. Учитывая, что в колебаниях расходов воды Голубого Нила, в отличие от колебаний уровня озера Тана, наблюдаются

высокочастотные составляющие, они исключались путем скользящего сглаживания ряда (рис. 8). Восстановление уровня озера Тана по расходам р. Голубой Нил проводилось в период с 1959 по 1997 годы.

Из рисунка 8 следует, что до 1970 года ход расходов Голубого Нила и уровней озера Тана практически совпадают. Однако после строительства плотин Росейрес и Эль-дием и забора воды на хозяйственные нужды водность Голубого Нила несколько снизилась.



Рис 7: Колебания расходов воды Голубого Нила (восстановлены) и расходов Асуана

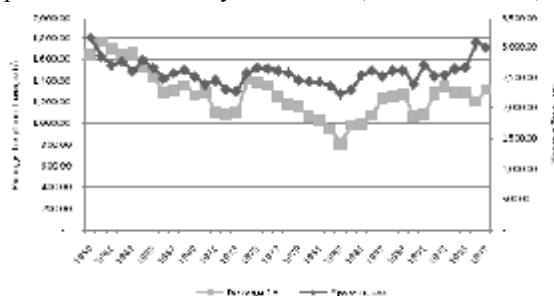
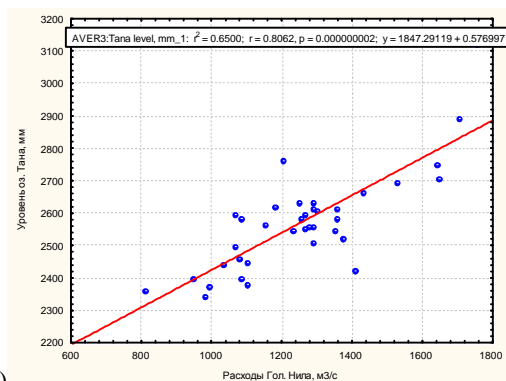
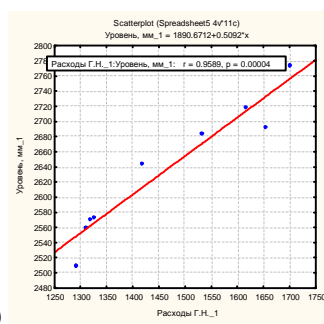


Рис. 8 Колебания расходов воды Голубого Нила и уровня озера Тана с 1959 по 1997

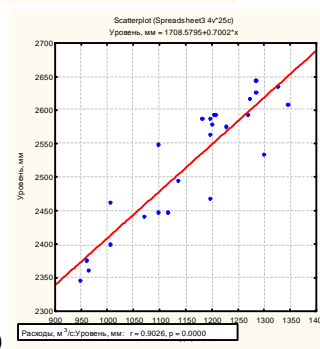
Зависимость расходов Голубого Нила от уровня озера Тана представлена на рисунке 9(а). Учитывая влияния хозяйственной деятельности, зависимость неоднозначна, хотя коэффициент корреляции достигает 0.81. Анализ представленной зависимости показывает, что ее следует разделить на два периода (рис 9 б, в), теснота связи в которые возрастает.



(а)



(б)



(в)

Рис. 9 Зависимость расходов Голубого Нила от уровня озера Тана а - за период (1959-1997), б – за период 1959 – 1970, в – за период 1971 – 1997.

Сравнение водности Голубого Нила у Хартума и Белого Нила у Малакеля с расходами Нила у Асуана показало, что наибольшие расходы воды в Ниле наступают при высокой водности Голубого Нила. Согласно Арсеню больше 86% годового объема стока поступает в реку Нил с территории Эфиопии по трем его крупнейшим притокам: Голубой Нил, Текезе (Атбара) и Баро (Собат). Поэтому и коэффициент корреляции

между расходами воды Голубого Нила и Нила у Асуана равен 0.86 (рис 10). При этом ряды ограничены 1965 г., когда была начата строительство гидростанции Насер.

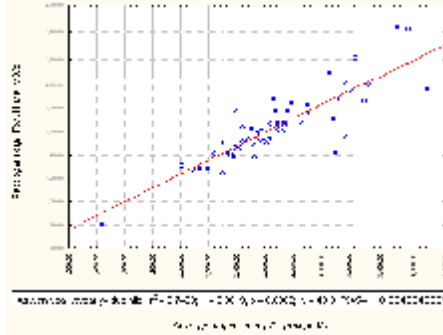


Рис. 10 Связь расходов Голубого Нила у Хартума и Нила у Асуана за период с 1912 по 1965 г

Используя полученные зависимости, восстанавливались уровни озера Тана с 1871 по 1959 г. Ряд восстановленных уровней представлен на рис 13. Анализ этого ряда показал наличие значительного отрицательного тренда. Общее снижение уровня воды в озере за этот период превысило 60 см. Такое систематическое снижение уровня в первую очередь следует связать с изменением климатических условий, а в конце XX века и с возрастанием антропогенной нагрузки.

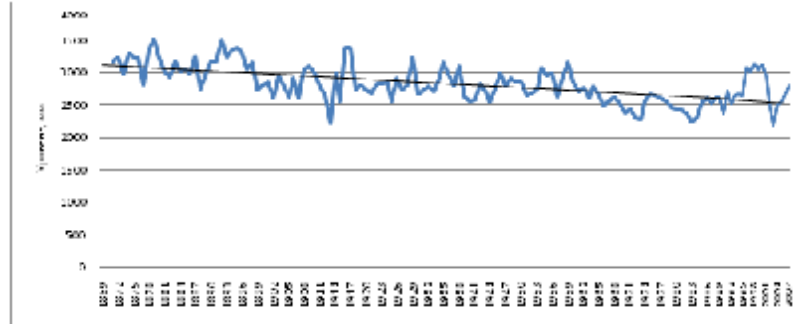


Рис. 11 Восстановленные многолетние колебания уровня и тренд озера Тана

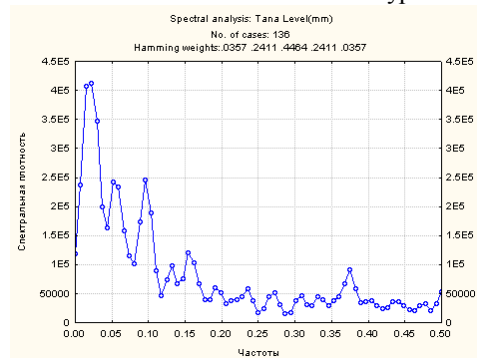


Рис. 12 Оценка спектральной плотности уровня озера Тана

Одним из показателей структурных особенностей рядов является наличие разночастотных квазипериодических колебаний. Их продолжительности оценивались с помощью спектрального анализа (рис 14). При этом предварительно исключался отрицательный тренд. Оценка спектральной плотности  $S^*(\omega)$ , рассчитанная по восстановленному ряду значений уровня воды озера Тана, продолжительность которого достигает уже 137 лет, имеет вид красного шума, на фоне которого наиболее четко выражены всплески энергии на частотах  $\omega = 0.025, 0.06, 0.1$ , соответствующих 40-42, 20-22, 11 – летним колебаниям. Следует отметить, что такая же полицикличность свойственна крупным озерам засушливых областей Евразии и Африки.

Для восстановления рядов осадков и температуры воздуха в период, предшествовавший периоду инструментальных наблюдений, использовалась зависимость между изменениями увлажненности бассейна озера Тана и колебаниями его уровня, полученная ранее для периода с 1959 по 2005 годы.

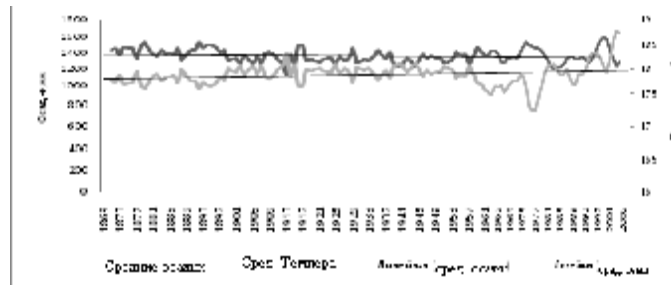


Рис 13 Многолетние восстановленные осадки и температуры озера Тана

Восстановленные ряды представлены на рисунке 15. Из рисунка видно, что ряды температуры воздуха и осадки находятся в противофазе. Общие тенденции следующие: температура воздуха повышается, а количество осадков понижается. Поскольку рассмотренные параметры являются главными показателями климата, который оценивается с помощью индекса увлажненности  $\gamma$ , расчеты показывают уменьшение  $\gamma$  во времени от  $81.1\text{mm}/^\circ\text{C}$  (1871г.) до  $62.8\text{mm}/^\circ\text{C}$  (2005г.). Уменьшение увлажненности бассейна озера Тана приводит к снижению уровня озера.

В шестой главе «Возможности экстраполяции уровня» рассматриваются регрессионные модели и стохастической модели АРСС и оценивается их применимость для экстраполяции временных рядов.

В основу использования регрессионной модели положена установленная ранее зависимость уровня от климатических изменений, которая показала, что наиболее тесная связь между  $H$  и  $\gamma$  наблюдается при сдвиге на 1-2 года. Этот сдвиг можно использовать как заблаговременность предсказания. Результат экстраполяции представлен на рис 14.

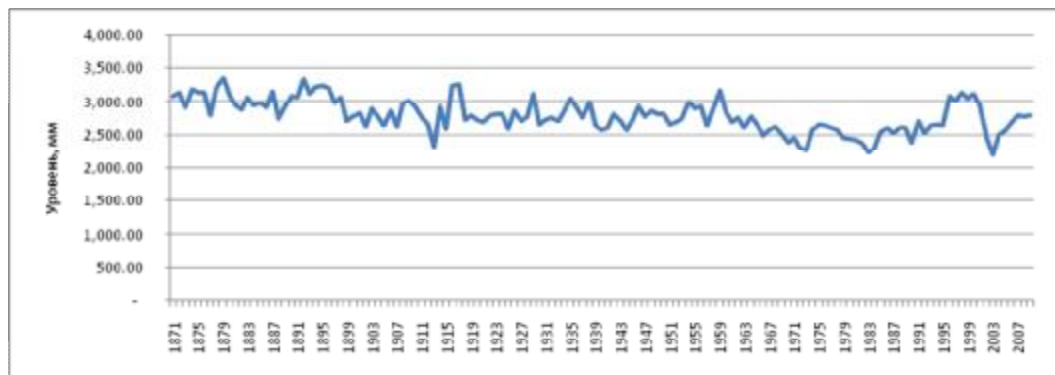


Рис 14 Экстраполяция при применении регрессионный метод

Большинство временных рядов  $y_t$  содержат элементы, которые последовательно зависят друг от друга. Такую зависимость можно выразить следующим уравнением:

$$y_t = \zeta + \beta_1 \cdot y_{(t-1)} + \beta_2 \cdot y_{(t-2)} + \beta_3 \cdot y_{(t-3)} + \dots + \varepsilon \quad (17)$$

где  $\varepsilon$  - константа (свободный член),  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  - параметры авторегрессии.

В отличие от процесса авторегрессии, в процессе скользящего среднего каждый элемент ряда подвержен суммарному воздействию предыдущих ошибок. В общем виде это можно записать следующим образом:

$$y_t = \mu + \varepsilon_t - \alpha_1 \cdot \varepsilon_{(t-1)} - \alpha_2 \cdot \varepsilon_{(t-2)} - \alpha_3 \cdot \varepsilon_{(t-3)} - \dots \quad (18)$$

где  $\mu$  - константа,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , - параметры скользящего среднего.

На практике для получения экономической параметризации иногда бывает необходимо включать в модель как члены, описывающие авторегрессию, так и члены, моделирующие скользящее среднее. Такая случайная последовательность может быть определена уравнением

$$Y_t = \sum_{j=0}^n b_j Y_{t-j} + \sum_{r=0}^m a_r e_{t-r} \quad (19)$$

Экстраполяция годовых уровней озера Тана по модели АРСС выполнена двумя способами. Первый способ заключался в использовании модели АРСС, учитывающей как эволюционную, так и циклическую нестационарность. Модель включала один сезонный параметр авторегрессии и один сезонный параметр скользящего среднего. Исходный ряд трансформировался трижды в ходе логарифмирования, взятия разности с шагом 1 (для устранения эволюционной нестационарности и взятия разности с шагом 12 (для устранения циклической нестационарности)). Второй способ заключался в использовании модели АРСС, включающей один сезонный параметр авторегрессии и один сезонный параметр скользящего среднего. При

этом исходный ряд годовых уровней озера Тана предварительно фильтровался для исключения эволюционной нестационарности. Оба способа показали, что экстраполяция может быть выполнена только на 1 – 2 шага вперед. Общий вид модели для стационарной последовательности уровня озера имеет вид:

$$Y_t = 0.61Y_{t-1} + 0.38\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \quad (20)$$

Результаты экстраполяции представлены на рисунке 15б. Согласно полученным результатам экстраполяция может быть выполнена лишь на один два шага вперед.

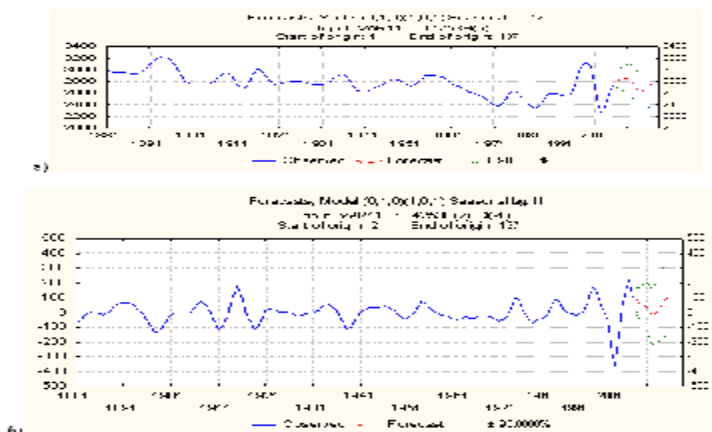


Рис. 15: Экстраполяции уровня озера Тана: а – с трендом, б – после исключения тренда

### Основные выводы

Основные выводы диссертационной работы сводятся к следующим.

1. На территории северо-восточной Африки расположены озера с разными формами котловин: близкой к параболе (озера Тана и Зивай); близкой к полушару (озера Абиата и Аваса); близкой к плоскому цилиндру (озера Лангано и Шала). Анализ графиков зависимостей объема воды в озерах от их площадей  $w = f(F)$  подтверждает гипотезу о том, что котловины одного и того же происхождения и примерно одинакового периода эволюции имеют приблизительно одинаковые относительные размеры. График зависимости формы котловин от высоты местности  $\phi = f(Z)$  показал, что при увеличении  $Z$  форма котловин приближается к конусу, и при уменьшении  $Z$  – стремится к плоскому цилиндру. Коэффициент развития береговой линии также зависит от высоты места, возрастая с ее увеличением.
2. На территории северо-восточной Африки распространены озера разных типов водообмена: бессточные, сточные и периодические сточные. В западной части Эфиопии расположены преимущественно сточные озера. При движении на восток увеличивается количество бессточных озер. Такое распределение связано в большей степени с возрастанием в указанном направлении аридности климата, чем с увеличением значений критических удельных водосборов.
3. При движении с запада на восток рассматриваемой территории меняется и структура водного баланса. Все большую роль в расходной части приобретает испарение. Поэтому особое значение для условий северо-восточной Африки имеет расчет испарения. Для оценки испарения привлекались четыре известных метода. Показано, что наилучшие результаты дают методы Пенмана и Пристли–Тейлора. Для изучения структуры водного баланса построены серии гиперболических графиков, отражающих зависимость долей стока и испарения в расходной части баланса и долей притока и осадков в приходной части баланса от удельных водосборов и условий увлажненности. Это позволило контролировать проведенные водно-балансовые расчеты. Согласно нормам, принятым в России, водный баланс решен с достаточной точностью.
4. Годовые уровни озер рассчитывались по уравнению водного баланса через приращения и сравнивались с фактическими значениями. Анализ восстановленного ряда годовых высот уровня воды в озере Тана продолжительностью 137 лет показал наличие значительного отрицательного тренда. Общее снижение уровня в период с 1871 по 2005 гг. превысило 60 см. На фоне тренда в структуре ряда наблюдаются разночастотные квазипериодические колебания. Выборочный спектр имеет вид спектра красного шума с четко выраженными всплесками энергии на частотах  $\omega = 0.025, 0.05, 0.9$ , соответствующих 40–42, 20–22, 11 – летним колебаниям. Аналогичная полицикличность характерна и для крупнейших озер засушливой зоны Евразия и Африки.
5. Для характеристики климата северо-восточной Африки оценивались индексы увлажненности бассейнов озер  $\gamma$ . Показано, что в период с 1871 по 2005 гг. наблюдалось уменьшение увлажненности с  $81.1 \text{ мм}^\circ \text{С}$  до  $62.8 \text{ мм}^\circ \text{С}$ . Анализ восстановленных рядов годовых осадков и температуры воздуха позволил выявить тенденции на повышение температуры воздуха и уменьшение осадков. Таким образом, в последние 137 лет на территории северо-восточной Африки наблюдалось потепление климата.

6. Закономерности изменения индексов увлажненности бассейнов озер хорошо согласуются с характером изменений их уровня. Поэтому, уровни озер можно использовать как интегральный показатель изменений климата. Уменьшение увлажненности в бассейне озера Тана приводит к снижению его уровня, на которое накладывается и уменьшение, вызванное хозяйственной деятельностью.
7. Применение регрессионных моделей и моделей АРПСС показало, что экстраполяция уровня и, следовательно, увлажненности бассейнов возможна на 1 – 2 ближайших года.

*Основные публикации*

1. Догановский А.М., Гетахун Б.А. Водный баланс и уровенный режим озера Тана//География и смежные науки LX Герценовские чтения, 2007, -№ 60, -с. 31-42.
2. Doganovsky A.M. and Getahun B.A., 2008. Water balance and level regime of Ethiopian lakes as integral indicators of climate change// Proceedings of Taal2007: The 12<sup>th</sup> World Lake Conference: 1092-1102.
3. Гетахун Б. А. **Многолетние колебания и экстраполяция данных об уровне озера Тана с учетом изменения климата**// Вестн. С.-Петерб. у-та. Сер.7, вып. 2, 2009. С. (в печати, справка предлагается).
4. Getahun B.A. **Estimation of long-term annual water levels of lake Tana for analysis of climate change**//Географическая наука и образование в России: история и современное состояние, сборник научных трудов, международный конференции, 3 - 4 декабря 2008г, СПб, 2009. (в печати, справка предлагается).

Соискатель

Гетахун Брук Абат