

Министерство образования и науки  
Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО  
Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)

На правах рукописи  
УДК 551.435

Ахмедова Наталья Сергеевна

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И  
МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КОТЛОВИН  
КАРСТОВЫХ ОЗЕР МИРА

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт- Петербург – 2011

Работа выполнена на кафедре физической географии и природопользования  
Российского государственного педагогического университета им.  
А.И.Герцена

Научный руководитель:

доктор географических наук, профессор  
Сергей Валентинович Рянжин

Официальные оппоненты:

доктор географических наук, профессор  
Аркадий Михайлович Догановский

кандидат географических наук,  
Игорь Николаевич Сорокин

Ведущая организация:

Государственный гидрологический институт

Защита состоится «9» июня 2011 г. в 15 часов 30 минут на заседании  
диссертационного совета Д 212.197.02 в Российском государственном  
гидрометеорологическом университете  
по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98, актовый  
зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского  
государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан « 3 » мая 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. геогр. наук



В.Н.Воробьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Изучение географического распространения, генезиса карстовых процессов и явлений актуально, поскольку помогает прогнозировать развитие карстообразовательных процессов и избежать многих опасных последствий. Например, возникновение провальных воронок вблизи зданий и инженерных сооружений. При этом значительное место среди карстовых явлений занимают недостаточно изученные карстовые озера (карстовые, суффозионные и термокарстовые), запасы пресной воды в которых, до сих пор, не оценены. Исследование данного вопроса могло бы внести вклад в решение ряда задач Федеральной Государственной программы «Чистая вода» (2009-17 гг.), предполагающей реформирование и модернизацию сектора водоснабжения и водоотведения России. Кроме того, проведенная типизация карстовых озер по морфометрическим параметрам внесла вклад в изучение особенностей морфологического строения озерных котловин карстового происхождения. Именно этими обстоятельствами и определяется актуальность темы диссертационного исследования. Изучение перечисленных вопросов стало возможным на основе анализа обширных натуральных данных по карстовым озерам мира, собранных в разработанной в последние годы базе данных по озерам и водохранилищам мира WORLDLAKE (Ryanzhin, Straskraba, 1999; Рянжин, Ульянова 2000; Ryanzhin 2003).

**Цель работы:** выявление особенностей географического распространения и морфологического строения котловин карстовых озер мира. Для достижения указанной цели были сформулированы следующие **задачи:**

1. Расширить и уточнить базу данных WORLDLAKE на основе новых натуральных, литературных и картографических источников.
2. Оценить степень лимнологической изученности карстовых озер по литературным, картографическим и фондовым данным.
3. Выявить особенности географического распространения карстовых озер мира.
4. Проанализировать основные морфометрические параметры котловин карстовых озер с использованием статистических методов.
5. Оценить объем запасов вод карстовых озер.
6. Выявить глобальные и региональные особенности морфологического строения котловин карстовых озер.

**Объектом исследования** являются котловины карстовых озер мира.

**Предмет исследования** – географическое распространение и морфологическое строение котловин карстовых озер мира.

**Материал и методы.** Основой работы послужили натурные данные по морфометрическим параметрам 1018 карстовых озер мира, собранные в базе WORLDLAKE. Данные базы собирались и дополнялись на основании результатов собственных исследований, публикаций, кадастров озер,

архивных данных, внутренних отчетов научно-исследовательских центров и анализа топографических карт.

Для выполнения поставленных задач использовался картографический метод, комплекс методов статистического анализа: компонентный (метод главных компонент), факторный, кластерный, регрессионный, а также теория проверки статистических гипотез.

**Научная новизна:**

1. Впервые составлена карта-схема «Распространение карстовых озер мира» и выявлены особенности географического распространения карстовых озер мира.

2. Впервые рассчитаны модели для определения морфометрических параметров озерных котловин карстовых озер.

3. Впервые произведена оценка запасов воды карстовых озер мира.

4. Впервые выявлен перечень морфометрических параметров, с которыми связана наибольшая изменчивость строения котловин карстовых озер.

5. Выявлены три морфологических типа котловин карстового происхождения.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Особенности географического распространения карстовых озер мира.  
2. Особенности морфологического строения котловин карстовых озер мира.

3. Особенности морфологического строения котловин карстовых озер бассейна Верхней и Средней Волги.

**Практическая значимость работы.** Полученные в работе результаты использованы при оценке запасов вод карстовых озер, расчете неизвестных значений морфометрических параметров озерных котловин по известным параметрам. Полученная информация о размещении карстовых озер позволяет прогнозировать развитие процессов карстообразования на рассматриваемой территории.

**Теоретическая значимость работы.** Получены новые знания об особенностях географического распространения и морфологического строения карстовых озер. Анализ генетических классификаций озер позволил проследить развитие научных знаний в области лимногенеза.

**Достоверность результатов** основана на анализе уникальных данных по карстовым озерам мира, собранных в базе данных WORLDLAKE, с использованием современных методов статистического анализа.

**Личный вклад автора.** Автор принимал участие в сборе натуральных материалов, в экспедиционных исследованиях на территории Кировской области, дополнении базы данных WORLDLAKE. Выполнены статистические расчеты, проведен анализ полученных результатов.

**Апробация работы.** Результаты исследований по теме диссертации были представлены на межвузовских научно-методических конференциях: Герценовские чтения «География и смежные науки», Санкт-Петербург, 2008, 2009, 2010 гг.; XI межвузовской молодежной конференции СПбГУ «Школа

экологической геологии и рационального недропользования», Санкт-Петербург, 2008 г.; Международной научной конференции «Геоэкологические проблемы современности» Владимирского государственного гуманитарного Университета, 2008 г.; I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти А.П. Карпинского, ФГУП «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург, 2009 г.; III Всероссийской практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Географическое изучение территориальных систем» Пермского государственного университета, 2009 г.; Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие и Геоэкологические проблемы Балтийского региона» Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого, 2009 г. и др.; семинарах кафедры физической географии и природопользования Российского государственного педагогического университета им. А.И.Герцена, 2010 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 3 - в журналах из перечня ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 154 машинописных страницы, включая 57 рисунков, 23 таблицы и 8 приложений на 23 страницах. Список литературы насчитывает 198 наименований, в том числе 42 – зарубежных источника.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, выявляется его научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

**Глава 1. Физико – географические особенности распространения карстовых озер мира** состоит из 5 разделов, в которых рассматривается история развития лимнологии как науки, карстосферы – как части литосферы, сущность карстообразовательных процессов, и в частности, образование и геохимическая природа различных типов карстовых котловин, и в целом, карстовые озера рассматриваются как уникальные природные объекты, являющиеся источниками пресной воды.

Лимнология – комплексная наука, занимающаяся изучением водоемов замедленного водообмена – озерами, водохранилищами, прудами. Основоположником лимнологии считается швейцарский ученый Ф.А. Форель (1892). Основы русской школы лимнологии заложены Д.Н.Анучиным (1896), Л.С.Бергом (1908) и А.И.Воейковым (1948). В развитии лимнологии можно выделить два основных периода: «предысторию», которая начинается условно с древнего периода, и «историю» – с 1895 г., когда на VI географическом конгрессе в Лондоне Ф.А.Форель сформулировал основные цели и задачи лимнологии. Научные знания развивались также поэтапно. Так, анализ генетических классификаций позволяет сделать вывод о том, что лимнологические знания

с конца XIX до начала XXI века становились более конкретными и структурированными.

Озера карстового происхождения являются важнейшими лимнологическими объектами, входящими в состав карстосферы. В зависимости от преобладающего процесса: растворения, механического выноса, протаивания, оказывающего влияния на легкорастворимые породы, - традиционно выделяют три типа котловин карстовых озер: карстовые, суффозионные и термокарстовые.

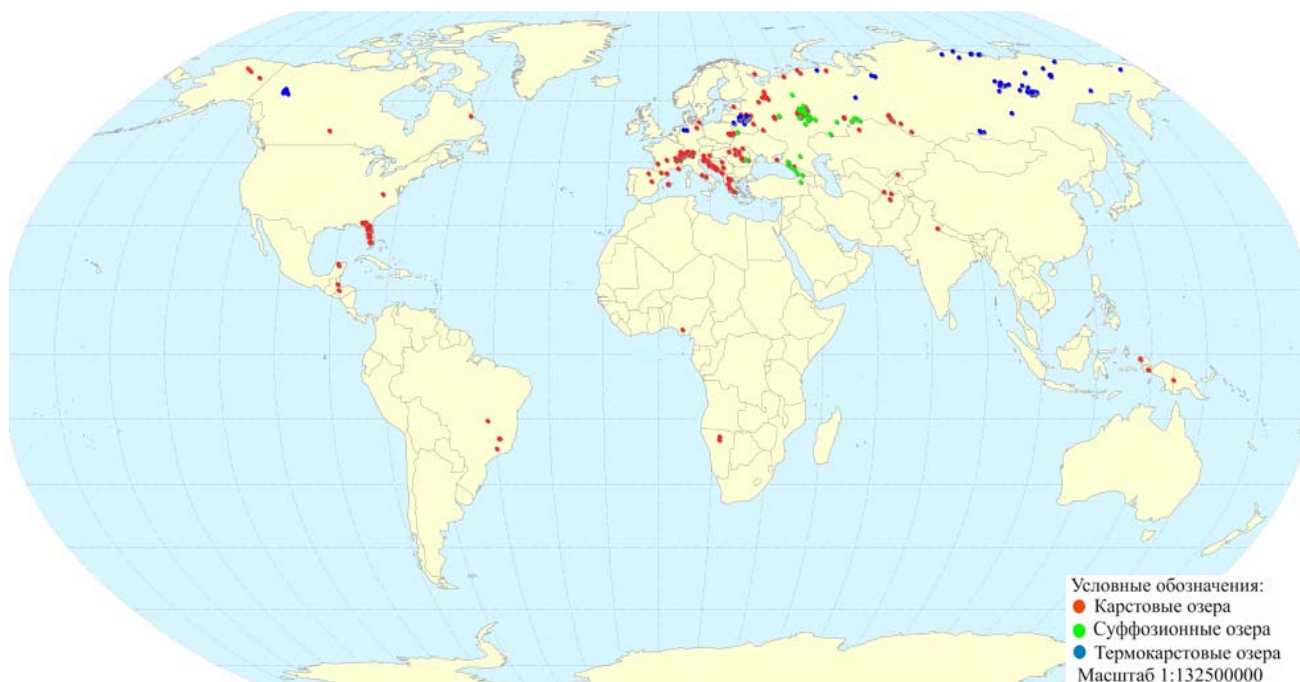


Рисунок 1. Географическое распространение карстовых озер мира (выявленное автором на основе базы данных WORLDLAKE)

Карстовые озера распространены практически на всех континентах (Рис. 1). Наибольшее их количество отмечено в зарубежной Европе (Альпы, Балканы, Карпаты и др.), на территории России: на Урале, в европейской (Поволжье, Вологодская и Архангельская области и др.) и азиатской части (Якутия) (Рис. 2).

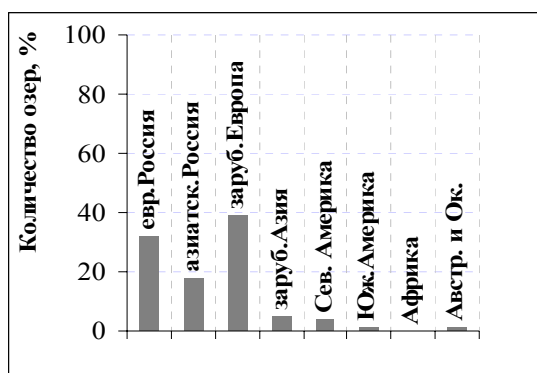


Рисунок. 2. Континентальные распределения карстовых озер, содержащихся в базе данных WORLDLAKE

Причем, карстовые озера преобладают в Зарубежной Европе, суффозионные - на территории европейской, а термокарстовые - азиатской части России. В широтном распространении отмечено значительное преобладание карстовых озер в умеренном поясе северного полушария, где доминируют отрицательные формы рельефа, а также почти полное отсутствие карстовых озер в тропическом и субтропическом поясах южного полушария (Рис. 3).

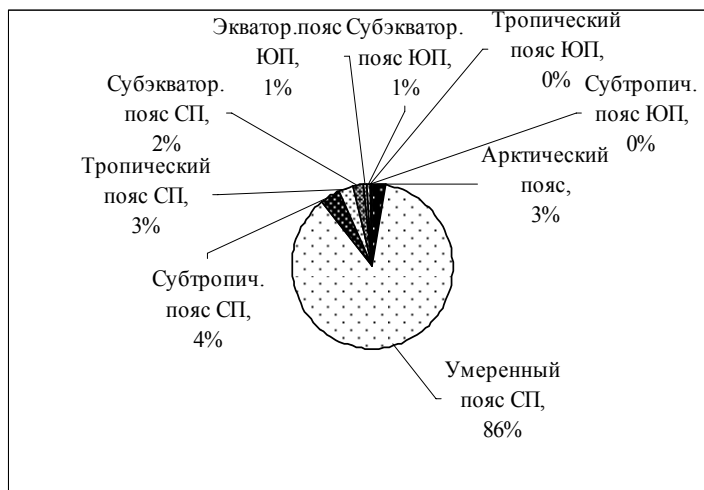


Рисунок 3. Широтное распространение карстовых озер, содержащихся в базе данных WORLDLAKE

Примечание: СП – северное полушарие, ЮП – южное полушарие

Таким образом, образование котловин карстового происхождения связано с комплексом природно-климатических факторов, первостепенным из которых является геологический. Преобладающая часть котловин карстового происхождения приурочена к зонам трещиноватости пород (например, в местах синклинальных и антиклинальных складок) и связана с карбонатными породами мезозойского возраста.

Кроме того, важно учитывать не только наличие растворимой породы, ее водопроницаемость, но и движущиеся воды, их растворяющую способность. К факторам, обеспечивающим движение воды и вынос продуктов растворения пород, относятся особенности климата и рельефа. Необходимым условием формирования карстовых котловин является наличие достаточного количества тепла и влаги. Наибольшая концентрация карстовых озер характерна для плоских равнинных участков с достаточной увлажненностью (до 400 мм/год) зоны умеренных широт (Рис. 1, 3). Причем, важны и гидрогеологические условия, то есть особенности подземной циркуляции, положение уровня грунтовых вод, от которых и зависит карстование пород. На плоских поверхностях атмосферные осадки просачиваются, а на склонах быстро стекают и не успевают растворить породу, что и объясняет установленное преобладание карстовых озер на уровне до 200 м над уровнем моря (Рис. 4).

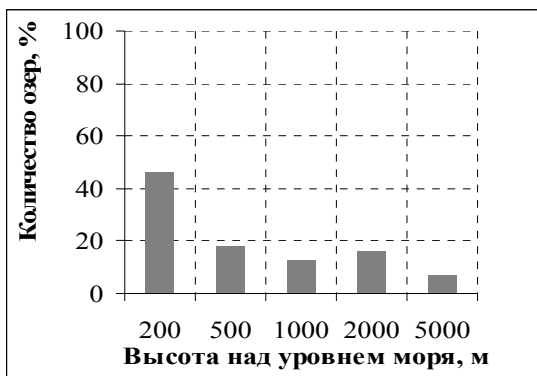


Рисунок 4. Распространение карстовых озер относительно высоты над уровнем моря (выполненное автором на основе базы данных WORLDLAKE)

Тем не менее, котловины карстового происхождения встречаются не только на равнинах, но и в горных областях. С последними связана особенность усиления мощности «глубинных карстообразовательных процессов» с высотой: увеличение глубины с уменьшением площади зеркала озера. В целом отмечается закономерное уменьшение закарстованности горных пород с глубиной, что связано с уменьшением скважности и водопроницаемости пород с глубиной, уменьшением градиентов напора, интенсивности водообмена, степени агрессивности вод и др.

В связи с нарастающей проблемой нехватки пресной воды важной является информация о ее запасах. Решение этой глобальной проблемы связано, в первую очередь, с реализацией различного рода государственных программ. Так, например, с действующей Федеральной Государственной программой «Чистая вода» (2009 – 17 гг.), которая ставит одной из основных задач создание единой информационной аналитической базы. Произвести корректную оценку запасов вод карстовых озер невозможно без наличия кадастров, баз данных (например, WORLDLAKE).

На земном шаре, по приближенным расчетам, насчитывается  $8.45 \cdot 10^6$  естественных озер с площадями зеркала  $A \geq 0.01 \text{ км}^2$ . Только в России их более 2 млн. При этом суммарный объем озер достигает  $>179.6 \cdot 10^3 \text{ км}^3$ , что превышает объем воды в руслах всех рек мира более чем в 80 раз (Рянжин, 2005). В работе установлено, что статистическое распределение объемов карстовых озер, также, как озер другого генезиса, носит степенной характер, то есть с уменьшением объемов озер число таких озер увеличивается (Рис. 5). При этом по оценкам автора на долю озер карстового происхождения приходится более  $16 \text{ км}^3$  пресных озерных вод (Рис.6).

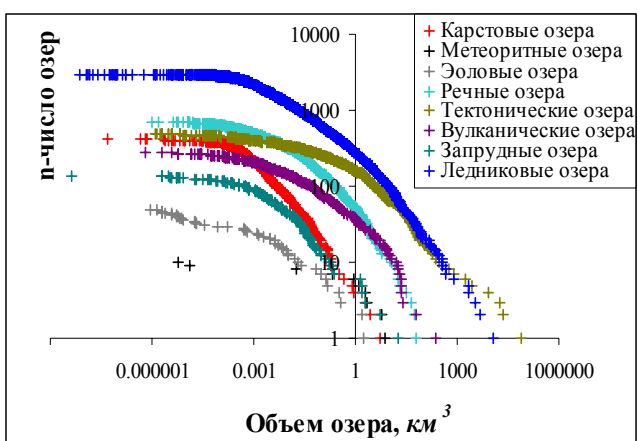


Рисунок 5. Интегральные распределения объемов котловин озер различного генезиса (рассчитанные автором на основе данных базы WORLDLAKE)



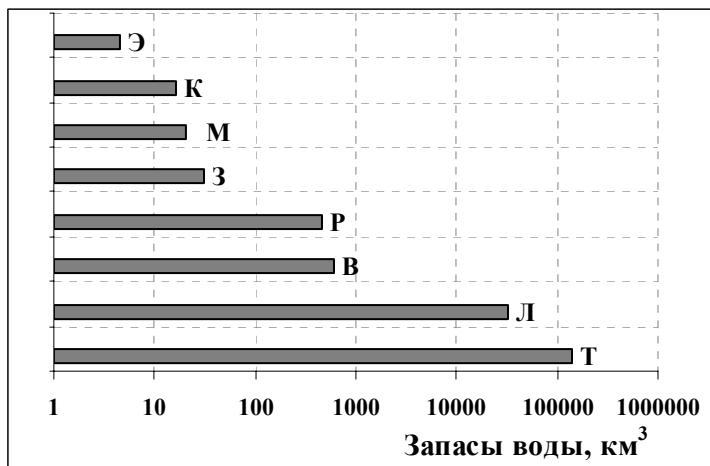


Рисунок 6. Запасы пресных озерных вод различного генезиса (рассчитанные автором на основе данных базы WORLDLAKE)

Примечание: Э – эоловые, К – карстовые, М – метеоритные, З – завальные, Р – речные, В – вулканические, Л – ледниковые, Т – тектонические

**Глава 2. Материал и методы исследования** состоит из 2 разделов, в которых описывается методика сбора исходной информации, дается общая характеристика данных. В качестве исходных данных в работе были взяты морфометрические параметры котловин карстового происхождения, содержащиеся в авторской базе данных WORLDLAKE.

Морфометрия озер является частью геоморфологии озер и рассматривается как раздел лимнологии для количественной характеристики форм, размеров котловин и объема занимающих их вод. Морфометрические показатели (длина, ширина, длина береговой линии, площадь зеркала, объем, максимальная и средняя глубина) имеют первостепенное значение для лимнологических исследований.

Использование морфометрических, статистических классификаций позволяет систематизировать и сравнивать котловины карстового происхождения по ряду морфометрических параметров. Морфометрические классификации, предложенные П.В.Ивановым (1948), Г.А.Максимовичем (1956) по характеристике «площадных» и «глубинных» показателей ( $A$ ,  $H_{avg}$ ,  $H_{max}$ ), которые наиболее часто используются при лимнологическом анализе, в работе подвергнуты критическому анализу. Причина – установленные степенные распределения значений  $A$ ,  $H_{avg}$ ,  $H_{max}$ , не учитываемые в своих классификациях указанными авторами. С другой стороны, за основу в работе были приняты классификации по коэффициенту емкости – С.Д.Муравейского (1948) и коэффициенту удлиненности – Г.Ю.Верещагина (1930), поскольку безразмерные характеристики имеют минимальные и максимальные значения и, как установлено в работе, не подчиняются степенным распределениям. Использование подобных классификаций позволяет проследить диапазон изменчивости морфометрических параметров внутри одного или между различными генетическими классами котловин озер, в том числе, типами карстовых озер, находить взаимосвязь морфологического строения с комплексом геологических, физико-географических условий территории.

Для анализа морфометрических параметров использовались: метод регрессионного анализа (Айвазян, 1973), теория проверки статистических гипотез (Богданов, 1984), одномерные и многомерные методы анализа лимнологической информации: метод главных компонент (Мяэметс,

Райтвийр, 1975; Малинин, Гордеева, 2003), факторный (Харман, 1972; Адаменко, Богданов, 1984; Кожара, 1989) и кластерный (Факторный..., 1989; Догановский, Мякишева, 2001).

**Глава 3. Особенности морфологического строения котловин карстовых озер мира** состоит из 3 разделов, в которых рассматривается изученность морфометрических параметров, особенности морфологического строения различных типов котловин карстового происхождения.

Значительная часть карстовых озер отличается слабой лимнологической изученностью. Так, из содержащихся в базе WORLDLAKE данных для 717 «лимнологически изученных» карстовых озер, то есть озер, в которых когда-либо проводились лимнологические исследования, только 413 (57.6%) относятся к «батиметрически измеренным», то есть озерам с известными средними глубинами  $H_{avg}$  и, следовательно, объемами озерных котловин  $V$  (поскольку объем озера определяется как  $V=A H_{avg}$ ) (Рис. 7). Примечательно, что в глобальном масштабе характерна, противоположная ситуация, когда число «батиметрически измеренных» значительно превосходит количество «лимнологически изученных» озер (Рянжин, 2005).

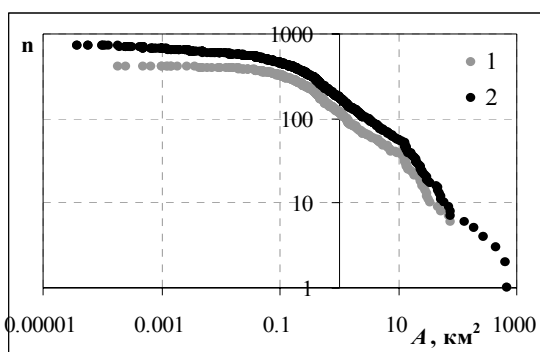


Рисунок 7. Статистические интегральные функции распределения «батиметрически измеренных» (1) и «лимнологически изученных» (2) карстовых озер мира по площадям зеркала  $A$  (рассчитано по данным базы WORLDLAKE),  $n$  – общее число озер

Кроме того, ранее было показано, что интегральные статистические распределения площадей  $A$  естественных озер в глобальном и региональном масштабах аппроксимируются степенными функциями вида (Ryanzhin, 2003; Рянжин, 2005):

$$n=C_1A^{C_2} \quad (1)$$

где  $n$  – число озер с площадью  $A \geq A_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  – регрессионные коэффициенты.

В работе установлено, что по аналогии с (1), интегральные статистические распределения площадей зеркала карстовых озер мира можно также в первом приближении аппроксимировать степенными функциями с коэффициентами  $C_2=-0.28$  и  $C_1=156.98$  соответственно (Рис. 7). Отсюда следует, что на Земле насчитывается примерно  $1.6 \cdot 10^2$  карстовых озер с площадями зеркала  $A \geq 1.0$  км<sup>2</sup>. Кроме того, отчетливо просматривается тенденция увеличения числа карстовых озер с уменьшением их площади, что проявляется и для озер мира в целом (Рянжин, 2005). Аналогичная тенденция установлена и для других размерных морфометрических параметров. Так, на

примере распределения средних глубин трех типов карстовых озер можно проследить диапазон изменчивости параметра в пространстве данного признака (Рис. 8).

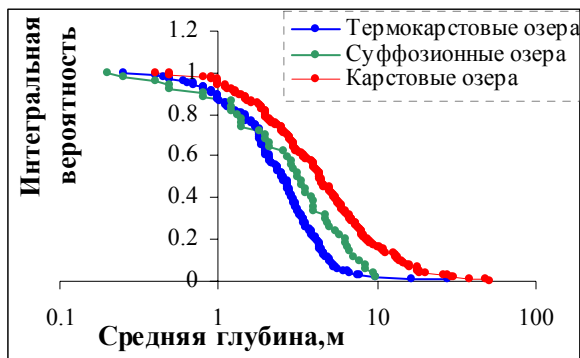


Рисунок 8. Распределение средних глубин различных типов карстовых озер мира по данным базы WORLDLAKE

Для оценки неизвестных морфометрических параметров по известным для различных типов котловин карстового происхождения были рассчитаны регрессионные модели (Табл. 1).

Таблица 1. Наиболее значимые регрессионные модели ряда морфометрических параметров различных типов карстовых озер

Типы карстовых озер		
Карстовые	Суффозионные	Термокарстовые
$A=110.58V^{0.88}$ $V=0.004A^{1.03}$ $(R^2=91\%)$	$A=144.99V^{0.87}$ $V=0.002A^{0.93}$ $(R^2=81\%)$	$A=81.73V^{0.75}$ $V=0.002A^{1.01}$ $(R^2=76\%)$
$H_{max}=2.4H_{avg}^{0.96}$ $H_{avg}=0.59H_{max}^{0.86}$ $(R^2=83\%)$	$H_{max}=1.89H_{avg}^{1.13}$ $H_{avg}=0.69H_{max}^{0.76}$ $(R^2=87\%)$	$H_{max}=2.03H_{avg}^{0.99}$ $H_{avg}=0.63H_{max}^{0.84}$ $(R^2=84\%)$

Рассчитанные модели дают адекватные значения параметров. Кроме того, необходимо отметить, например, что модель для расчета объема озера имеет регрессионные коэффициенты статистически близкие к коэффициентам, рассчитанным для более чем 15 000 озер мира:  $C_3=0.0034$ ,  $C_4=1.13$  (Рянжин, 2005). Зависимость  $V$  и  $A$  чрезвычайно важна. Например, в условиях недостатка информации для оценки объемов «батиметрически неизмеренных» озер по сравнительно легко доступной (например, в результате дистанционной съемки) информации о площадях озер. Кроме того, с использованием статистически значимых моделей, зная максимальную глубину озера, можно оценить его среднюю глубину. Так, при максимальной глубине 10 м средняя глубина оказывается равной около 4 м, что вполне соответствует средним морфометрическим параметрам котловин карстовых озер.

Условия образования озерных котловин специфичны для каждого типа карстовых озер и отражаются на морфометрических параметрах. Поэтому был проведен факторный анализ отдельно для каждого типа озер. В

результате были выделены доминирующие факторы с соответствующими характеристиками (Табл. 2). Исходными данными послужила матрица морфометрических параметров 190 карстовых озер мира (база данных WORLDLAKE): размерные ( $A$  - площадь зеркала, км<sup>2</sup>;  $B$  - ширина, км;  $H_{max}$  - максимальная глубина, м;  $H_{avg}$  - средняя глубина, м;  $L$  - длина, км;  $l$  - длина береговой линии, км;  $V$  - объем, км<sup>3</sup>) и безразмерные ( $S_{hLD}$  - коэффициент извилистости береговой линии,  $C$  - коэффициент емкости,  $K_u$  - коэффициент удлиненности,  $K_{ot}$  - коэффициент открытости,  $a$  - коэффициент «глубинности»). Таким образом, размерность матрицы составила 190 случаев × 12 характеристик.

Таблица 2. Сравнительные характеристики факторного анализа различных генетических типов карстовых озер

	Карстовые	Суффозионные	Термокарстовые
Число случаев			
Суммарная доля дисперсии, описываемая значимыми факторами, %	92.5	89.9	85.8
<b>Фактор 1</b> – Суммарная доля дисперсии, % – Характеристики, связанные с этим фактором	43.2 <i>A, V, l, B, L</i>	39.8 <i>A, V, l, B, L</i>	29.4 <i>H<sub>avg</sub>, H<sub>max</sub>, K<sub>ot</sub>, a.</i>
<b>Фактор 2</b> – Суммарная доля дисперсии, % – Характеристики, связанные с этим фактором	27.0 <i>H<sub>avg</sub>, H<sub>max</sub>, K<sub>ot</sub>, a</i>	32.5 <i>H<sub>avg</sub>, H<sub>max</sub>, K<sub>ot</sub>, a</i>	27.2 <i>l, B, L, S<sub>hLD</sub></i>
<b>Фактор 3</b> – Суммарная доля дисперсии, % – Характеристики, связанные с этим фактором	9.6 <i>C</i>	17.6 <i>C, K<sub>u</sub></i>	18.6 <i>A, V</i>
<b>Фактор 4</b> – Суммарная доля дисперсии, % – Характеристики, связанные с этим фактором	12.6 <i>K<sub>u</sub></i>	–	10.7 <i>K<sub>u</sub></i>

Примечание: жирным шрифтом выделены доминирующие морфометрические параметры

**Фактор 1** – описывает наибольшую долю дисперсии «площадных характеристик» рассматриваемых в горизонтальном направлении (площадь зеркала, длина береговой линии, ширина, длина), объем, для карстовых (43.2%) и суффозионных озер (39.8%). Причем, доля дисперсии для карстовых озер наибольшая, что, видимо, говорит о наиболее выраженном характере протекания процессов образования озерной котловины.

Для термокарстовых озер морфометрические параметры, меняющиеся в «горизонтальном направлении» (длина береговой линии, ширина, длина, коэффициент извилистости) связаны с фактором 2, и на их долю приходится 27.2% суммарной дисперсии. Причем, такие морфометрические параметры, как площадь зеркала и объем выделяются в отдельный фактор 3, на долю которого приходится 18.6% суммарной доли дисперсии, что говорит о меньшей изменчивости этих параметров по сравнению с карстовыми и суффозионными озерами. Кроме того, именно в данном типе озер значимым является коэффициент извилистости, что говорит о том, что протаивание глубинного, неравномерно распространенного «мерзлотного комплекса» оказывает непосредственное влияние на форму зеркала озера в «горизонтальном» и «вертикальном» разрезе.

**Фактор 2** – описывает наибольшую долю дисперсии «глубинных характеристик», рассматриваемых в вертикальном направлении (максимальная и средняя глубина, коэффициент глубинности, коэффициент открытости) карстовых (27.0%) и суффозионных (32.5%) озер. Причем, суммарная доля дисперсии суффозионных озер выше карстовых и термокарстовых озер (29.4%), что, видимо, объясняется «провальным характером» образования котловин в результате механического выноса частиц из породы (суффозия). Часто суффозионные процессы образования озерных котловин связаны с масштабностью развивающихся процессов. Так, например, отмечено озеро суффозионного происхождения с максимальной глубиной  $H_{max}=426$  м - оз. Кезенной-Ам (Азербайджан). Для термокарстовых озер «глубинные характеристики» (максимальная и средняя глубина, коэффициент глубинности, коэффициент открытости) связаны с фактором 1. Доля суммарной дисперсии составляет 29.4%, что меньше доли дисперсии суффозионных (32.5 %) озер. Преобладание вертикальных характеристик над горизонтальными для данного типа котловин, вероятно, можно объяснить тем, что протаивание «мерзлотного комплекса» осуществляется чаще небольшими по площади участками, в вертикальном направлении.

**Фактор 3** - описывает суммарную долю дисперсии безразмерных параметров, характеризующих форму зеркала (коэффициент удлиненности) и объема (коэффициент емкости). Так, для суффозионных озер характерна наибольшая доля дисперсии рассмотренных параметров ( $C, K_u=17.6\%$ ), что, возможно, связано с механическими процессами выноса частиц. Для карстовых озер суммарная доля дисперсии объема котловины составляет 9.6%. Причем, коэффициент емкости (9.6%) и коэффициент удлиненности (12.6%) выступают как разные доминирующие факторы (фактор 3 и 4 соответственно).

**Фактор 4** – связан с коэффициентом удлиненности всех типов рассматриваемых озер (кроме суффозионных озер). Так, наибольшая изменчивость характерна для карстовых, наименьшая – для термокарстовых озер (доля суммарной дисперсии 12.6% и 10.7 % соответственно).

Таким образом, факторный анализ, проведенный отдельно для каждого типа озер показал, что наибольшая изменчивость связана с «горизонтальными» морфометрическими параметрами («площадными параметрами»), меньше с морфометрическими параметрами «вертикальной направленности» («глубинными параметрами») для карстовых и суффозионных озер. Характер поведения морфометрических параметров озерных котловин относительно похож у карстовых и суффозионных и несколько отличен у термокарстовых озер. Для термокарстовых озер фактором 1 является фактор с морфометрическими параметрами вертикальной направленности (максимальная и средняя глубина, коэффициент глубинности, коэффициент открытости), а фактор 2 помимо ряда морфометрических параметров горизонтального направления (длина береговой линии, ширина, длина) содержит еще и коэффициент извилистости, который статистически не значим для двух других генетических типов озер. Отметим, что некоторые лимнологи относят тип термокарстовых озер к классу ледниковых. Так, например, Б.Б.Богословский (1960) и ряд других исследователей считают, что по действующему фактору образования они близки к ледниковым.

Кроме того, в ходе отдельно проводимого компонентного анализа выявлены доминирующие морфометрические параметры, с которыми связана наибольшая изменчивость морфологии котловин карстовых озер (Табл. 2). Этими параметрами являются: длина озера, максимальная глубина и коэффициент извилистости, которые описывают 77.6% дисперсии. Остальные параметры являются избыточными, так как дублируют вышеуказанные или являются малоинформативными при разделении озер между собой. Преобладание данных морфометрических параметров над остальными говорит о «провальной» природе образования карстовых озер.

Для объективного разделения карстовых озер на типы применялись методы кластерного анализа. В работе используется иерархический алгоритм анализа данных. Классификации были выстроены с использованием расстояния Евклида, что имеет большую ценность, поскольку объективно показываются различия между классами и объединение кластеров осуществляется по методу Уорда. Произведено разделение всей совокупности озер по трем доминирующим морфометрическим параметрам (Рис. 9).

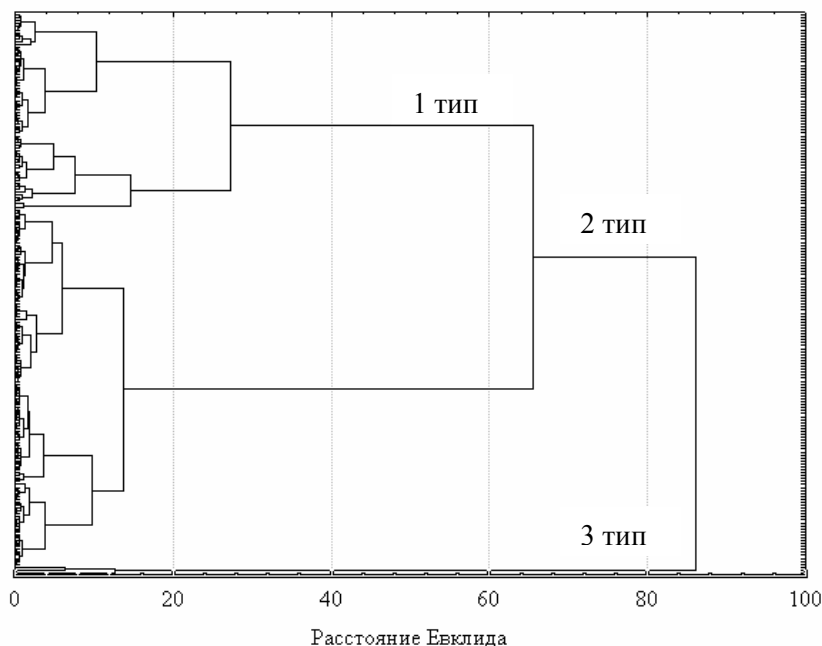


Рисунок 9. Дендрограмма классификации карстовых озер, построенная автором на основании трех независимых доминирующих параметров

На основании анализа рис. 9 выделяются три морфологических типа котловин карстового происхождения. Анализ структуры образовавшихся типов показал, что четкого разделения по генезису не произошло. Установлено, что генезис не является «единственным, ключевым моментом» при формировании морфологического строения озерных котловин. Кроме генетических особенностей, на формирование морфологического строения котловины озера оказывает влияние местоположение, эволюция, связанная в первую очередь с климатом, возрастом озера, а в последние десятилетия также хозяйственная деятельность человека.

На основании анализа средних значений морфометрических параметров выявлены морфологические особенности, свойственные котловинам карстового, суффозионного, термокарстового происхождения. В ходе проводимого одномерного и многомерного анализа получены идентичные результаты, что подтверждает их надежность. Так, первый тип, свойственный озерам карстового происхождения, характеризует их как – большие по площади, глубокие, округлые, с большой долей вытянутых, параболоидной формы котловины; суффозионного происхождения – маленькие по площади, неглубокие, удлиненные, неизвилистые, параболоидной формы котловины; термокарстовые – небольшие, мелкие, округлые, извилистые, параболоидной формы котловины.

**Глава 4. Особенности морфологического строения котловин карстовых озер бассейна Верхней и Средней Волги** состоит из 4 разделов, в которых рассматривается лимнологическая изученность территории, физико-географические предпосылки образования котловин карстового

происхождения. На основе статистических методов рассмотрена структура морфометрических параметров, выявлены особенности морфологического строения котловин карстового происхождения.

Территория Верхней и Средней Волги располагается в центральной части европейской территории России, в бассейнах рек Волги и Вятки. Были проанализированы данные по карстовым озерам, расположенным на территории Кировской, Нижегородской областей, республик Чувашия, Марий-Эл и Татарстан. Для формирования котловин карстового происхождения на территории имеются физико-географические и геологические предпосылки. Кристаллический фундамент располагается на глубине 1700-2000 м, а залегающие породы (в том числе карстовые) имеют преимущественно один возраст – казанский ярус верхней Перми. Известняки, доломиты, гипсы, ангидриты, мергели, песчаники, сланцы и др. залегают на небольшой глубине либо выходят на дневную поверхность. Рельеф отличается большой пересеченностью. Растворяющее действие на породы оказывают также дождевые осадки (60-70% годовых осадков) и деятельность подземных вод. Суммарное количество осадков превышает испарение, поэтому основная территория района достаточно увлажнена. Территория отличается высокой обеспеченностью водными ресурсами: поверхностными и подземными водами. Главным источником поверхностных вод является река Волга с ее притоками. Лимнологический режим карстовых озер заметно отличается от озер другого происхождения, прежде всего, за счет значительной доли подземного стока-притока в их водном балансе. Этим, в частности, объясняются «внезапные» изменения уровня и даже исчезновение карстовых озер. Термический режим также способствует развитию карстового процесса. Средняя температура января  $-14^{\circ}\text{C}$ , а июля  $+18^{\circ}\text{C}$ , большая часть года – время с активными положительными температурами (Алисов, 1967). Таким образом, наличие карстовых и суффозионных озер, расположенных на рассматриваемой территории, объясняется наличием карстующихся, трещиноватых пород, пересеченностью рельефа, растворяющей деятельностью атмосферных осадков и подземных вод.

Рассматриваемая территория недостаточно лимнологически изучена. С целью комплексного изучения карстообразовательных процессов, в том числе, котловин карстового происхождения была организована комплексная научно-исследовательская Средне-Волжская геологоразведочная экспедиция. Работы проводились в 1980–83 гг., в ходе которых были исследованы большие карстовые озера и составлен государственный кадастр изученности озер (Государственный кадастр..., 2001). Проведенная научно-исследовательская работа была наиболее крупной среди всех проведенных работ на данной территории. Слабая лимнологическая изученность территории отражается на небольшом объеме имеющихся данных по морфометрическим параметрам. Так, исходными данными в работе послужили морфометрические параметры (размерные и безразмерные) 156 карстовых озер, из которых 97 – карстовые, 59 – суффозионные. Примечательно, для карстовых озер территории характерна ситуация, когда



из 156 «лимнологически изученных» озер, лишь 25 являются «батиметрически измеренными» (соответственно 16.0%) (Рис. 10). Аналогичная тенденция характерна для карстовых озер мира.

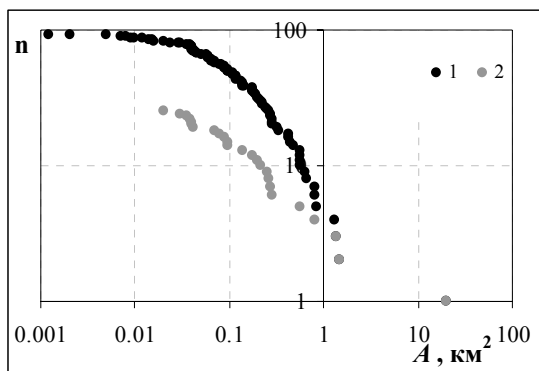


Рисунок 10. Статистические интегральные функции распределения «батиметрически измеренных» (1) и «лимнологически изученных» (2) карстовых озер территории (156 озер) по площадям зеркала  $A$  (рассчитано по данным базы WORLDLAKE),  $n$  – общее число озер

Установлено, что интегральные статистические распределения площадей зеркала карстовых озер на территории бассейна Верхней и Средней Волги можно в первом приближении аппроксимировать степенными функциями вида (1) с коэффициентами  $C_5=-0.55$  и  $C_6=10.26$  (Рис. 10). Отчетливо просматривается тенденция увеличения числа озер с уменьшением их площадей зеркала озер, что проявляется в глобальном (Рянжин, 2005) и региональном (Рянжин и др., 2010) масштабах. Аналогичная тенденция просматривается и на других морфометрических параметрах. С целью восстановления «информационной базы» по морфометрическим параметрам озерных котловин ( $A, B, H_{max}, H_{avg}, L, l, V$ ) на основе имеющихся данных были составлены регрессионные модели вида (2), (3) для статистически значимых параметров. Эти результаты имеют большое прикладное значение:

$$V=C_7 \cdot A^C_8, \quad (2)$$

где  $[A]=\text{км}^2$ ,  $[V]=\text{км}^3$ ;  $C_7=0.005$ ,  $C_8=1.04$  – регрессионные коэффициенты. Модель (2) дает разумные значения. Например, для озер с площадью  $1 \text{ км}^2$  (2) подразумевает среднюю глубину 5 м. Кроме того, регрессия (2) близка к зависимости, рассчитанной автором с коэффициентами для различных типов карстовых озер мира: карстовые ( $C_9=0.004$ ,  $C_{10}=1.03$ ), суффозионные ( $C_{11}=0.002$ ,  $C_{12}=0.93$ ). Кроме того, они близки к регрессионным коэффициентам ( $C_{13}=0.0034$ ,  $C_{14}=1.13$ ), рассчитанным для более чем 15 000 озер мира (Рянжин, 2005). Часто в литературе приводятся данные только по максимальным глубинам озер, хотя средняя глубина является также важным морфологическим показателем. Рассчитанная регрессионная модель (3) позволяет рассчитать средние глубины по максимальным:

$$H_{avg}=C_{15} \cdot H_{max}^C_{16} \quad (3)$$

где  $[H_{avg}]=\text{м}$ ,  $[H_{max}]=\text{м}$ ;  $C_{15}=0.74$ ,  $C_{16}=0.76$  – регрессионные коэффициенты. Модель дает разумные значения. Так, при максимальной глубине 14.8 м

средняя глубина оказывается равной 5.8 м. При этом регрессия (3) близка к зависимости, рассчитанной для карстовых озер мира:  $C_{17}=0.60$  и  $C_{18}=0.85$ .

С целью выявления морфологических особенностей различных типов котловин проведен кластерный анализ на 10 морфометрических параметрах (размерных и безразмерных). Исходными данными послужила матрица из морфометрических параметров 44 карстовых озер: размерные ( $A$  - площадь зеркала, км<sup>2</sup>;  $B$  - ширина, км;  $H_{max}$  - максимальная глубина, м;  $H_{avg}$  - средняя глубина, м;  $L$  - длина, км;  $V$  - объем, км<sup>3</sup> и безразмерные:  $C$  - коэффициент емкости,  $K_u$  - коэффициент удлиненности,  $K_{ot}$  - коэффициент открытости,  $a$  - коэффициент «глубинности»). Таким образом, размерность матрицы составила 44 случая  $\times$  10 характеристик. Классификация проводилась по методу Уорда, с использованием евклидовой метрики. Результатом послужило построение дендрограммы, на которой прослеживается четкое деление на три типа (Рис. 11).

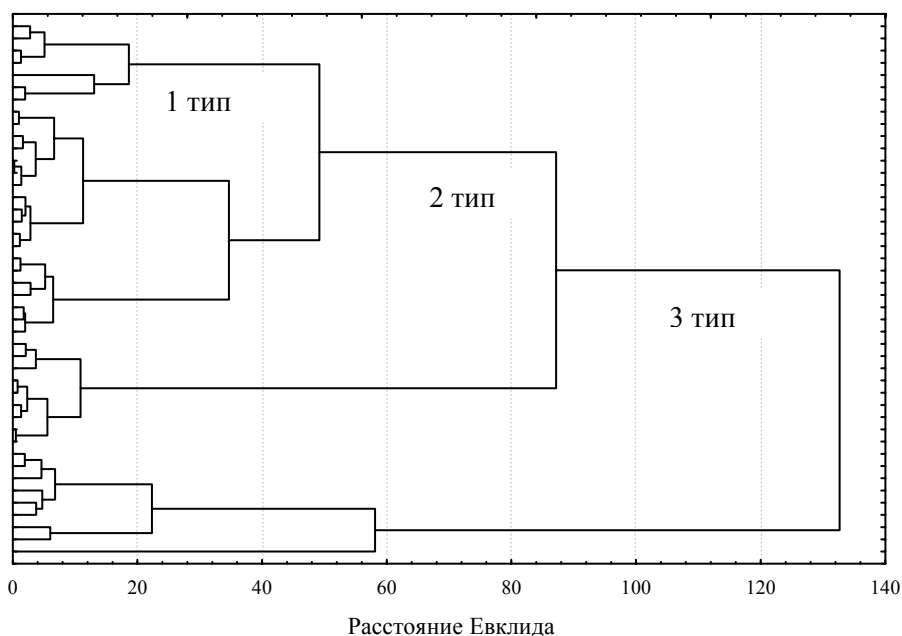


Рисунок 11. Дендрограмма классификации карстовых озер Верхней и Средней Волги, построенная автором на основании десяти морфометрических параметров

Установлено разделение всей совокупности озер на 3 типа. Причем, к первому и второму типу относятся котловины суффозионного происхождения (рассматриваются как один тип), к третьему – карстового происхождения. Морфологические особенности двух типов котловин, выделенные на основании проводимого кластерного анализа по десяти параметрам, в целом совпали и дополнили аналогичные особенности, выведенные для первого, второго типа в ходе проводимого кластерного анализа по трем параметрам на мировой выборке. В целом, результаты, полученные на основе проводимого одномерного и многомерного анализа, идентичны. Так, к первому типу относятся большие по площади, глубокие, округлые, часто вытянутые озера, ко второму – маленькие по площади зеркала, неглубокие, удлиненной формы. Кроме того, также необходимо

отметить, что распределения морфометрических параметров носят степенной характер, наблюдается уменьшение величины морфометрических параметров с увеличением количества озер.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. С использованием натуральных, литературных и картографических лимнологических данных по карстовым (карстовым, суффозионным и термокарстовым) озерам мира была значительно расширена и уточнена база данных WORLDLAKE. При этом отмечена недостаточная изученность карстовых озер: доля «батиметрически измеренных» составляет 57.6% от «лимнологически изученных» озер.

2. На основании анализа географических характеристик по 1018 карстовым озерам, содержащихся в базе данных WORLDLAKE, впервые построена карта-схема «Распространение карстовых озер мира». Выявлены особенности пространственного распространения карстовых озер мира. В частности, наибольшее их количество отмечено в зарубежной Европе (Альпы, Балканы, Карпаты и др.), на территории России: на Урале, в европейской (Поволжье, Вологодская и Архангельская области и др.) и азиатской части (Якутия). Причем, карстовые озера преобладают в Зарубежной Европе, суффозионные на территории европейской, а термокарстовые в азиатской части России. Установлено, что преобладающая часть карстовых озер расположена в умеренном поясе северного полушария, где доминируют отрицательные формы рельефа.

3. Образование большинства котловин карстового происхождения связано с залеганием пород преимущественно карбонатного состава мезозойского возраста в зонах трещиноватости (например, в местах синклинальных и антиклинальных складок). Наибольшая концентрация озер отмечена на достаточно увлажненных участках (до 400 мм/год) и высотах до 200 м.н.у.м., поскольку на равнинных участках интенсивнее идет просачивание и карстообразование. С высотой отмечено усиление «глубинных процессов»: увеличение глубины с уменьшением площади зеркала озера.

4. Впервые установлено, что для карстовых озер размерные морфометрические характеристики (площадь и объем озера, максимальная и средняя глубина и др.) подчиняются степенным статистическим распределениям вида (1), тогда как распределения безразмерных характеристик (коэффициенты извилистости береговой линии, формы и др.) отличаются от степенных. Так, например, распределение объемов носит степенной характер и по общим оценкам суммарный запас воды, содержащийся в карстовых озерах мира, составляет более 16 км<sup>3</sup>.

5. Для карстовых озер различных типов рассчитан ряд регрессионных моделей, связывающих различные статистически значимые морфометрические характеристики озерных котловин. Модели имеют большое практическое значение, поскольку позволяют оценить неизвестные

морфометрические характеристики карстовых озер по известным характеристикам.

6. Установлено, что наибольшая изменчивость морфометрических параметров карстовых озер связана с длиной озера как «площадным параметром», максимальной глубиной как «глубинным параметром» и с коэффициентом извилистости, что объясняет «провальную» природу образования карстовых озер.

7. Генезис не является «единственным, ключевым моментом» при формировании морфологического строения озерных котловин. Кроме генетических особенностей, на морфологию котловины озера оказывает влияние местоположение, эволюция, связанная в первую очередь с климатом, возрастом озера, а в последние десятилетия и хозяйственная деятельность человека.

8. Установленные морфологические типы котловин карстового происхождения идентичны для озер, рассматриваемых в мировом и региональном масштабе (бассейн Верхней и Средней Волги). Так, карстовые озера - большие по площади, глубокие, округлые с большой долей вытянутых, параболоидные с большой долей конусообразных котловин; суффозионные озера – маленькие по площади, неглубокие, удлинённые, неизвилистые, параболоидной формы котловины; термокарстовые озера – небольшие по площади, мелкие, округлые, извилистые, параболоидной формы котловин.

### Список публикаций по теме диссертации

#### *Публикации в изданиях, входящих в Перечень журналов, рекомендованных ВАК*

*Ахмедова Н.С., Рянжин С.В.* Морфометрические особенности карстовых озер бассейна Верхней и Средней Волги // Известия Русского географического общества, 2009. Т. 141. Вып. 2. №6, - С. 41-47.

*Рянжин С.В., Субетто Д.А., Кочков Н.В., Ахмедова Н.С., Вейнмейстер Н.В.* Полярные озера мира: современные данные и состояние исследований. // Водные ресурсы, 2010. Т. 37. №4. - С. 387-397.

*Ахмедова Н.С.* Классификация котловин карстовых озер мира по особенностям морфологического строения на основе кластерного анализа // Общество. Среда. Развитие. 2011. №1. – С. 228-232.

#### *Публикации в периодических изданиях и материалы конференций*

*Ахмедова Н.С.* Загадочное карстовое озеро Шайтан в Кировской области // География и смежные науки LXI. Герценовские чтения. Материалы ежегодной Всероссийской научно-методической конференции, Санкт-Петербург, 24-25 апреля 2008 г. – СПб.: Тесса, 2008. - С. 25-30.

*Ахмедова Н.С.* Общая характеристика карстовых озер Кировской области // Геоэкологические проблемы современности. Материалы второй международной научной конференции, Владимир-Москва, 18-20 сентября 2008 г. – В-М.: ВГГУ, 2008. - С. 42-46.

*Ахмедова Н.С.* Геологические предпосылки развития и экологическое состояние карстовых озер Кировской области // Школа экологической геологии и рационального недропользования. Материалы девятой межвузовской молодежной конференции, СПб, 24-28 ноября 2008 г. – СПб.: СПбГУ, 2008. - С. 165-167.

*Ахмедова Н.С.* Влияние географических факторов на разные типы карста на территории европейской части России // I Международная научно – практическая конференция молодых ученых и специалистов, посвященная памяти А.П. Карпинского, СПб, 24 – 27 февраля 2009 г. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. - С. 5-7.

*Ахмедова Н.С.* Проблемы генетических классификаций озерных котловин (на примере карстовых озер) // География: проблемы науки и образования. LXII Герценовские чтения. Материалы ежегодной Всероссийской научно-методической конференции, СПб, 9-10 апреля 2009 г. – СПб.: Астерион, 2009. Т. I. - С. 29-34.

*Ахмедова Н.С.* Развитие генетических классификаций озерных котловин в историческом аспекте // Вопросы гидрологии, геоэкологии и охраны водных объектов. Материалы межрегиональной научно-практической конференции студентов, магистров и аспирантов, Пермь, 22-25 апреля 2009 г. – Пермь.: Перм. гос. ун-т, 2009. Т. I. - С. 23-27.

*Ахмедова Н.С.* Проблема изученности морфометрических показателей озер мира при современной технической поддержке гидрологических исследований // Устойчивое развитие и Геоэкологические проблемы Балтийского региона. Материалы Международной научно-практической конференции, Великий Новгород, 23-25 октября 2009 г. – Великий Новгород.: Нов. гос. ун-т, 2009. Т. I. - С. 23-25.

*Ахмедова Н.С.* Особенности морфометрического строения различных типов карстовых озер // География: проблемы науки и образования. LXIII Герценовские чтения. Материалы ежегодной Всероссийской научно-методической конференции, Санкт-Петербург, 22-24 апреля 2010 г. – СПб.: Полиграф-Ресурс, 2010. - С. 360-362.

*Ахмедова Н.С.* Особенности географического распространения карстовых озер Кировской области // Пространственная организация, функционирование, динамика и эволюция природно-антропогенных и общественных географических систем. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Киров, 7-9 октября 2010 г. – Киров.: Вят.гос.гум.ун-т, 2010. Т. I. - С. 258-259.