

Министерство образования Российской Федерации
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 550.380+550.384+550.834+551.312

БОРИСОВ АНАТОЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ОТЛОЖЕНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ОЗЕР**

Специальность: 25.00.10 - геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

КАЗАНЬ - 2004

Работа выполнена в Казанском государственном университете

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук,
профессор **Владимир Михайлович Винокуров**
доктор физико-математических наук,
профессор **Гарри Зиновьевич Гурарий**
доктор физико-математических наук,
профессор **Алексей Никитич Храмов**

Ведущая организация:

Объединенный Институт Физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН
(г. Москва)

Защита состоится 26 марта 2004 г. в 14³⁰ на заседании Диссертационного Совета Д 212.081.04 при Казанском государственном университете по адресу: 420008, Казань, ул. Кремлевская 4/5, ауд. 205.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И.Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан 25 февраля 2004 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета,
кандидат геолого-минералогических наук, доц.  Д.И. Хасанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. На существующем этапе развития науки, палеомагнетизм отложений современных озер является относительно молодым направлением земного магнетизма. Возникшее менее четырех десятилетий назад, данное направление, наряду с прямыми наблюдениями, археомагнетизмом и палеомагнетизмом древних осадочных пород, позволяет изучать фундаментальные геомагнитные процессы, вызывающие эволюционные изменения во всех земных оболочках. Прошедшие годы, однако, не привели к широкому распространению палеомагнитных исследований отложений современных озер среди палеомагнитологов. Палеомагнитное изучение отложений современных озер практически не проводилось в Восточной Европе и в Центральной Азии; единичные наблюдения приходится на Африканский и Южно-Американский континенты. Во многом это объясняется существованием, на всех этапах палеомагнитных исследований донных осадков, целого комплекса технических и методических проблем. Создав систему технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер, мы открываем возможности широкого изучения во многом уникальных палеомагнитных объектов. Так для современных озерных котловин различного генетического типа характерным является регулярное, с момента формирования озера, накопление донных отложений, соответственно, получаемые ряды палеомагнитных данных обычно непрерывны в изучаемом временном интервале. Возраст существующих озер, а значит и длительность получаемых временных палеомагнитных рядов, колеблется в широком диапазоне - от миллионов до единиц лет. Осадконакопление в озерах происходит с достаточно высокой скоростью – от долей мм/год до десятков мм/год, что, в среднем, на порядок выше скорости осадконакопления в морях и океанах. Соответственно, в озерах с высокой скоростью осадконакопления разрешение палеомагнитной записи может достигать десятков лет, приближаясь к разрешенности исторических данных. Современные озера широко распространены на различных континентах; они, как правило, являются легко доступными объектами палеомагнитных исследований, что, в свою очередь, делает возможным изучение характеристик геомагнитного поля в трехмерной системе координат в заданном масштабе. Информация, получаемая при проведении палеомагнитных исследований отложений современных озер, многогранна и достаточно тонко отображает изменения, происходившие во всех оболочках Земли в период формирования осадков.

Цели и задачи работы. Основными целями работы являются: 1) разработка и обоснование системы технологического обеспечения различных этапов палеомагнитных исследований донных отложений современных озер; 2) получение, на основе палеомагнитных исследований осадков ряда современных озер Европы и Азии, новой надежной информации о про-

пространственных характеристиках геомагнитного поля за последние несколько тысяч лет.

В соответствии с поставленными целями, решались следующие задачи: а) технико-методическое обеспечение этапа опережающих исследований озерных отложений сейсмоакустическим методом; б) разработка технических средств и способов, позволяющих производить высокоточный отбор ориентированных непрерывных колонок разнообразных озерных отложений при полном сохранении первоначальной текстуры осадков; в) оптимизация технологии подготовки коллекций образцов донных отложений для палеомагнитных исследований; г) обоснование рационального комплекса методов диагностики магнитных минералов озерных отложений; д) получение, на основе разработанных технологий, новых надежных палеомагнитных данных по отложениям ряда современных озер Евро-Азиатского континента; е) уточнение пространственно-временных характеристик геомагнитного поля за последние несколько тысяч лет.

Исходные материалы исследований. В работе использованы материалы исследований и разработок, полученные непосредственно автором или при его участии в процессе полевых, лабораторных и интерпретационных этапов работ. В качестве объектов исследований при разработке системы технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер выступали 24 озера европейской и азиатской частей России, Белоруссии и Казахстана: озера Лесное, Ясное (Ульяновская обл.); озера Асликуль, Кандрыкуль (Западное Предуралье); Увильды, Тургаяк, Сургаяк, Сунукуль, Кисегач (Восточный Урал); озера Плещеево, Кубеньское, Галичское, Лача, Онежское (центр и север Европейской части России); озера Нарочь, Свирь (Белоруссия); озера Яркуль, Ик, Сартлан (Восточная Сибирь); озера Соленое, Югидем, Глухое, Кичиер (Республика Марий Эл); озеро Раифское (Республика Татарстан); Аральское море (Казахстан). По результатам рекогносцировочных исследований, на 20 озерах проводились детализационные работы с отбором колонок для палеомагнитного, магнито-минералогического, петрофизического и других анализов. В общей сложности было исследовано более 100 колонок мощностью от 1,0 до 6,5 метров. Коллекции образцов для палеомагнитных исследований были подготовлены более чем из 60 колонок, что составило ~8500 образцов.

Научная новизна и личный вклад автора. Автором были сформулированы и поставлены задачи, решение которых изложено в данной работе. Все основные научные результаты, представленные в работе, получены автором лично. Он руководил работами и лично принимал непосредственное участие на всех этапах и направлениях исследований: разработка аппаратурно-методических комплексов и программного обеспечения; подготовка, организация и проведение экспедиционных работ; проведение опережающих сейсмоакустических исследований; отбор коллекций; обоснование и применение методов палеомагнитных и магнито-минералогических исследований;

обработка и интерпретация получаемых материалов; пространственно-временной анализ данных палеомагнитных исследований отложений современных озер.

Научной новизной диссертационной работы являются:

1. Разработанная и обоснованная система технологического обеспечения палеомагнитных исследований озерных осадков, включающая в себя:
 - а) технологию опережающих сейсмоакустических работ при палеомагнитном изучении донных отложений
 - б) комплекс оборудования и методику работ по отбору ориентированного керна и высокоточной подготовки коллекций образцов озерных отложений различного генезиса
 - в) оптимальную технологию магнито-минералогических и палеомагнитных исследований современных озерных осадков;
2. Впервые полученные, по отложениям современных озер для территории Восточной Европы, пространственно-временные характеристики геомагнитного поля за последние несколько тысяч лет;
3. Впервые полученные детальные характеристики PSV за последние ~1200 лет для территории Средней Азии на основе высокоразрешенных палеомагнитных записей в осадках Аральского моря.

Основные защищаемые положения.

1. Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований озерных отложений, включающая в себя: а) аппаратно-методический комплекс для высокоточного отбора керна и подготовки коллекций ориентированных образцов различного типа озерных отложений; б) оптимальную систему магнито-минералогических и палеомагнитных исследований озерных отложений; в) технологию опережающих сейсмоакустических исследований донных отложений современных озер.
2. Пространственно-временные характеристики PSV за последние несколько тысяч лет для Восточной Европы и прилегающих территорий, зарегистрированные в отложениях современных озер.

Научная и практическая значимость работы. Разработанная автором система технологического обеспечения палеомагнитных исследований озерных отложений, включающая в себя комплексы технических средств, методические приемы полевых и лабораторных исследований, способы обработки и интерпретации получаемых данных, открывает перспективы широкого и повсеместного использования в палеомагнетизме уникальных объектов – отложений современных озер. Отдельные составляющие разработанной системы могут быть с успехом использованы не только в палеомагнетизме озерных осадков, но и при проведении разнообразных лимнологических исследований. Это касается в первую очередь изучения палеоклимата, озерных экосистем, решения экологических задач. Созданный специализированный озерный сейсмоакустический комплекс позволяет контролировать условия седиментации разнообразных водоемов, выявлять зоны эпиге-

нетических изменений осадков, решать задачи палеореконокструкций бассейнов. Уникальный донный телескопический пробоотборник позволяет получать ненарушенные ориентированные непрерывные колонки осадков мощностью до 6,5 метров не только в современных озерах различного генетического типа, но и на шельфах окраинных морей и в переходных зонах. Получение подобных колонок представляет научный и практический интерес для решения задач инженерной геологии, прикладной геофизики, палеомагнетизма. Конструктивные особенности разработанного пробоотборного комплекса и технология его использования делают его высококомобильным и недорогим инструментом исследований разнообразных донных отложений.

Впервые полученные достоверные палеомагнитные данные по ряду озер Евро-Азиатского континента позволяют существенно дополнить и уточнить пространственно-временные характеристики геомагнитного поля в голоцене и проследить их изменения на обширных, ранее неизученных территориях. Полученные палеомагнитные данные по детально нами изученным озерам вошли в мировые каталоги и используются, совместно с другими европейскими данными, для решения теоретических и практических задач геомагнетизма (Frank et al., 2002). Начиная с 1995 года, научная новизна исследовательских проектов автора по изучению отложений современных озер, получала признание и поддержку Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты работы докладывались на ежегодных итоговых научных конференциях Казанского государственного университета (Казань, 1983 - 2003 г.г.), неоднократно представлялись на семинарах по палеомагнетизму и магнетизму горных пород (Борок, 1999 - 2003 г.г.), на Всероссийской конференции "Мониторинг геологической среды: активные эндогенные и экзогенные процессы" (Казань, 1997 г.), на Юбилейной конференции "Геология и современность" (Казань, 1999 г.), на научно-практической конференции "Геоакустика -2001" (Москва, 2001), на Всероссийской научной конференции "Геология, Геохимия и Геофизика на рубеже XX и XXI веков" (Москва, 2002). Работы автора представлялись на 19-24 Генеральных ассамблеях Европейского геофизического союза (Гренобль - 1994 г., Гамбург - 1995 г., Гаага -1996 г., Вена - 1997 г., Ницца - 1998, 2003), Заседаниях рабочей группы GFZ (Потсдам, Германия - 2000 г.), международной конференции "Палеомагнетизм и магнетизм горных пород" (Словакия, 2000 г.), международной конференции "Baik - Sed - 2" (Бельгия, 2003), международной конференции INTAS по Аралу (Бухара, 2003 г.), международной конференции "Новая геометрия природы" (Казань, 2003). Всего по теме диссертационной работы опубликовано более 35 печатных работ, из них 2 монографии в соавторстве.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем работы 257 страниц; в работе содержится 108 рисунков, 6 таблиц; список литературы состоит из 317 наименований.

Благодарности. На всем протяжении выполнения данной работы автор пользовался поддержкой и помощью Д.К.Нургалиева, П.Г.Ясонова, Б.В.Бурова, В.П.Боронина; на различных этапах в работе принимали участие Ш.З.Ибрагимов, Д.И.Хасанов, И.Я.Жарков, И.Ю.Чернова, М.П.Гришина и многие другие. Выполнению работы способствовало обсуждение основных положений работы с Г.Н.Петровой, А.Н.Храмовым, Д.М.Печерским, Л.Е.Шолпо, А.Н.Диденко, Т.С.Гендлер, В.А.Большаковым, Г.З.Гурарием, В.С.Цирель, В.И.Белоконом, В.Э.Павловым, М.И.Малаховым, А.Ю.Казанским, С.П.Бурлацкой, И.Е.Начасовой, К.С.Бураковым, В.А.Бахмутовым, А.М.Глевасской, В.П.Щербаковым, В.В.Щербаковой, А.К.Гапеевым, В.М.Трубихиным, М.Л.Баженовым, А.Г.Иосифиди, Т.Б.Нечаевой, Г.Ф.Загнием и многими другими. Всем им автор выражает свою самую глубокую признательность. Отдельно хотелось бы поблагодарить зарубежных коллег, с которыми автор сотрудничает многие годы: профессоров Ken Creer (Эдинбург) – лекция которого в Казанском университете в 1991 году инициировала наши работы по озерным осадкам, Friedrich Heller (Цюрих) – начиная с 1994 года оказывал всемерную поддержку нашим исследованиям и по его инициативе в КГУ был передан криомагнитометр, Hedi Oberhänsli (Потсдам) – благодаря которой были проведены работы на Аральском море, а сейчас мы начинаем работы в районе Байкала.

Основная финансовая поддержка работ осуществлялась Казанским государственным университетом (Министерство образования РФ), отдельные разделы работы выполнены в рамках грантов РФФИ № 95-05-15416, № 99-05-65586, № 01-05-65457, ГНТП № 18 "Глобальные изменения", гранта Швейцарского научного фонда №7SUPJ048550, проекта ИНТАС (Арал-00-1030). Автор выражает благодарность всем этим организациям.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертационной работе рассматривается современное состояние палеомагнетизма озерных отложений – относительно молодого направления геомагнетизма, позволяющего решать, наряду с прямыми наблюдениями, археомагнитными и палеомагнитными исследованиями, фундаментальные проблемы земного магнетизма. Вариации элементов геомагнитного поля, выделяемые по данным прямых наблюдений, относятся, в основном, к спектру крутильных колебаний (20, 30, 60 и 120 лет). Исследования в области магнетизма горных пород, а также археологических памятников, позволили получить информацию о древнем геомагнитном поле в

более широком временном масштабе. Основной временной диапазон археомагнитных определений лежит в интервале от первых сотен до нескольких тысяч лет и ограничен временами существования известных цивилизаций, а также точностью исторических датировок. По археомагнитным данным установлен спектральный состав и дискретный характер "среднепериодных" PSV. Существенное расширение возможностей исследования тонкой структуры геомагнитного поля связано с изучением отложений современных озер. В настоящее время каталог мировых палеомагнитных данных, полученных по озерным отложениям, насчитывает несколько десятков наименований озер, причем их распределение по различным континентам крайне неравномерно. Наибольшее число выполненных исследований палеомагнитных характеристик осадков современных озер приходится на территорию Западной Европы, затем следуют Северная Америка и Австралия. Недостаточно изучены палеомагнитные характеристики отложений современных озер Южной Америки, Азии и Африки. Одновременно следует констатировать, что подобные работы на территории Восточной Европы и азиатской части бывшего СССР до наших исследований практически не проводились. Оценивая имеющуюся информацию о структуре и характере PSV, полученную по озерным осадкам, можно говорить о неплохой сходимости вариаций наклона геомагнитного поля в голоцене в северном полушарии. В спектре вариаций наклона проявляются устойчивые периоды в ~3800, ~2400, ~1400-1200 и ~600 лет. Сходимость вариаций наклона в северном полушарии значительно хуже и проявляется на угловых расстояниях, как правило, не более $40-50^{\circ}$. Определенные по озерным осадкам спектральные характеристики PSV в целом коррелируют с археомагнитными данными и результатами прямых наблюдений. Задача выявления и надежной оценки дрейфа недипольных компонент геомагнитного поля по озерным отложениям на данный момент остается нерешенной в виду недостаточности информации, низкой точности определений и крайне неравномерного распределения данных по различным континентам.

В произведенном анализе состояния палеомагнитных исследований современных озерных отложений необходимо подчеркнуть два аспекта. Во-первых, это значимость и ценность палеомагнитной информации, извлекаемой из отложений современных озер. Озерные палеомагнитные данные существенно расширяют возможности палеомагнитологии в изучении эволюции внутренних геосфер и процессов в жидком ядре и на границе ядро – мантия. Во-вторых, это существующие проблемы палеомагнитных исследований современных озерных отложений, существенно ограничивающие распространение и снижающие эффективность подобных работ. Данные проблемы обусловлены, в первую очередь, с отсутствием разработанной системы технологического обеспечения озерных палеомагнитных исследований.

Глава 1. Характеристика отложений современных озер как объектов палеомагнитных исследований

На территории континентов озера занимают ~ 2% площади (~2,7 млн. км²). Современные озера достаточно равномерно распространены по континентам. Согласно статистическому распределению, количество крупных и средних озер, представляющих наибольший интерес для палеомагнитных исследований, на континентах земного шара огромно и исчисляется десятками тысяч. Преобладающими средними глубинами таких озер является диапазон от единиц до нескольких десятков метров. Палеомагнитная информативность донных отложений современных озер во многом определяется седиментационными процессами, в ходе которых в осадках накапливаются железосодержащие частицы - носители естественной остаточной намагниченности (ЕОН). В отличие от морей и океанов, для озер характерны относительно высокие скорости седиментации, позволяющие получать на порядок (а в некоторых случаях и выше, как это было констатировано нами в глубоководном заливе Аральского моря) более разрешенную палеомагнитную запись по сравнению с океаническими осадками, для которых стандартной является тысячелетняя разрешенность палеомагнитной информации. Среди основных факторов, определяющих накопление и распределение магнитной фракции в озерных осадках, прежде всего, выступает климат и различные эндогенные и экзогенные процессы, от которых в свою очередь зависит гидрологический и гидрохимический режимы озерного водоема и преобладающий характер осадконакопления - терригенный, органогенный или хемогенный.

Природа носителей ЕОН озерных отложений существенно влияет на информативность получаемых палеомагнитных данных. Магнитные минералы аллотигенного происхождения попадают в озерные осадки из атмосферы или привносятся различными водными потоками. За счет эоловых процессов в озерных осадках накапливаются частицы ветровой эрозии, тephра, индустриальная пыль. Частицы метеоритного вещества также попадают в озерные осадки через атмосферу. Флювиальные потоки - как постоянные, так и временные, поверхностные и подземные - привносят в озера различные обломочные частицы, растворенные ионы железа, а также частицы изначально атмосферного происхождения, накопившиеся в ледяном и снежном покровах. Аутигенные железосодержащие минералы образуются в озерных осадках за счет биогенных и химических процессов. Разнообразие типов озер и многочисленные факторы, определяющие процессы осадконакопления в каждом из них, формируют индивидуальный качественный и количественный состав магнитной фракции, вид и компонентный состав преобладающей намагниченности. Зональное распределение осадков в бассейне каждого озера контролируется фациальной обстановкой, которая, в свою очередь, зависит от гидрологических условий. В конкретных гидрологических условиях работают те или иные механизмы распределения взвешенных и растворенных частиц, вследствие чего и происходит формирование различных фациальных типов осадков. Можно выделить две основные

группы, на которые, с точки зрения гидрологии и ее влияния на палеомагнетизм донных осадков, будут подразделяться все озера. Первую группу составляют гидрологически открытые озера, имеющие сток (например, исследованные нами озера Плещеево, Свирь). Вторую группу гидрологически закрытых озер образуют озера, которые лишены стока (например, Аральское море, озеро Соленое). Некоторые озера в своем развитии могут проходить через стадии закрытых и открытых озер. Общий водный баланс закрытых озер характеризуется тем, что потери при испарении и инфильтрации превышают приток плюс выпадение атмосферных осадков. Это способствует образованию высоких ионных концентраций и последующей хемогенной седиментации. Гидродинамический режим озер, формирующий конкретные фациальные условия накопления железосодержащих частиц, во многом определяется течениями. Во всех исследованных нами озерах, мы наблюдали одновременное присутствие нескольких типов течений, из которых наибольшее влияние на формирование осадков оказывала циркуляция, вызванная ветром. Меньшее значение, как правило, имели течения, вызванные впадением рек, прогревом литорали и гидрографические уклонные течения, направленные от места впадения реки к водосливу реки, вытекающей из озера. В достаточно мелких озерах поверхностные волны способны вызывать перенос донных осадков. В широких мелководных озерах, таких как исследованное нами оз. Лача в Карелии (средняя глубина 3,5 м), волны оказывают воздействие на донные осадки почти по всей площади озера. Как следствие, отложения подобных озер оказались практически непригодными для палеомагнитных исследований. Перераспределение магнитных частиц в озерных бассейнах вызывалось также термическим расслоением воды. Часто поступающая в озеро речная вода, несущая осадки, имеет большую плотность, чем вода в эпилимнионе, но меньшую по сравнению с холодной водой в гипolimнионе, и поэтому она течет по термоклину. Из таких поверхностных и подповерхностных потоков на дно оседают большей частью частицы алевритовой размерности, включая и магнитную фракцию. Гидрологические уклонные течения, геострофические течения и прогрев литорали редко вызывают движения воды, достаточно сильные, чтобы вызвать твердый сток материала дна, но как мы убедились, они играют решающую роль в переносе взвешенных железосодержащих частиц. Этот эффект наблюдался нами как в относительно небольших озерах (например, оз. Плещеево в Центральной России), так и в более крупных озерах, таких, как оз. Увильды Восточного Урала.

Выявление зон осадконакопления, потенциально неблагоприятных для проведения палеомагнитных исследований, является одной из важнейших задач рекогносцировочного этапа работ на водоеме. Решение данной задачи оказалось возможным при помощи разработанного специализированного сейсмоакустического комплекса, о чем подробно говорится в главе 2. Информация, получаемая при сейсмостратиграфической интерпретации акустических временных разрезов, позволяла нам выявлять интервалы с эпигенетическими изменениями осадков, наличие турбидитов, а также определять перерывы в осадконакоплении (рис. 1).

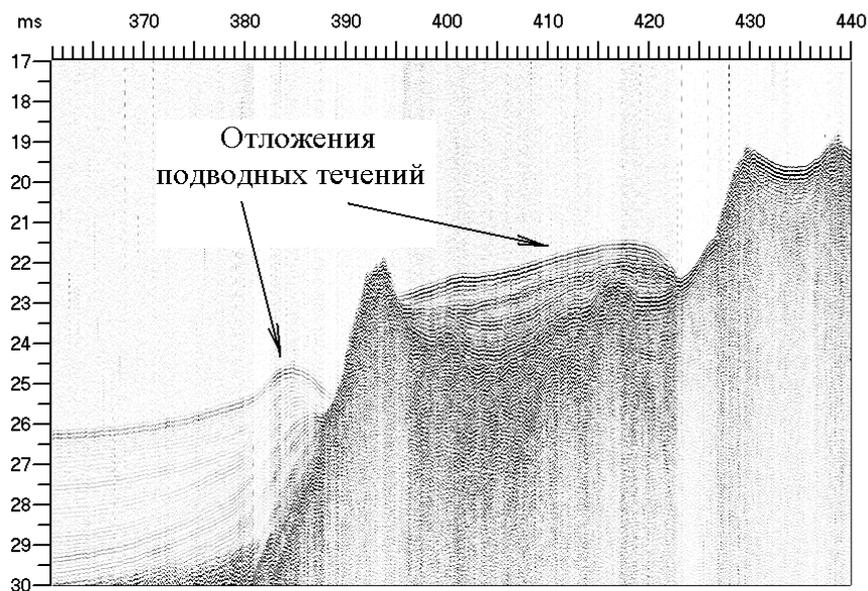


Рис. 1. Выявление сейсмоакустикой зон осадконакопления, потенциально неблагоприятных для проведения палеомагнитных исследований (фрагмент временного разреза оз. Увильды, Восточный Урал).

Наряду с донными течениями, на формирование озерных осадков и распределение в них магнитных частиц оказывает огромное влияние содержание кислорода в воде. Растворенный кислород играет весьма существенную роль в метаболизме водных аэробных организмов и во многом определяет протекающие в озере биологические и химические процессы. В периоды циркуляции воды, концентрация кислорода в озере находится в равновесии с атмосферой. В глубоких озерах, где имеются зоны, обедненные кислородом, вода может циркулировать в течение нескольких недель, прежде чем достигается равновесие. Кислородный баланс озерной воды формирует не только органическую составляющую озерных осадков, но также во многом и содержащуюся в них магнитную фракцию. Существенная роль магнитных частиц биогенного происхождения в составе осадков современных озер была выявлена относительно недавно. Во второй половине восьмидесятых - начале девяностых годов в пресноводных и морских осадках были обнаружены очень мелкие (<0.5 мкм) частицы магнетита, происхождение которого, как было доказано, связано с магнитобактериями. Формирование магнетита магнитотактическими бактериями происходит по схеме: $FeOON \Rightarrow Fe_3O_4$, причем магнетит биогенного происхождения в некоторых озерных осадках является основным носителем остаточной намагниченности [Higgitt et al., 1991]. Значительная роль магнетита биогенного происхождения была выявлена нами, в частности, в изученных осадках Аральского моря.

Для отложений современных озер, характеризующихся преимущественно ориентационной намагниченностью, давно доказана существенная роль процессов постседиментационного намагничивания (PDRM). Растянутые во времени, процессы постседиментационного намагничивания не

только искажают временную шкалу выделяемых палеомагнитных вариаций, но также существенно ослабляют их разнопериодные составляющие. Степень сглаживания и занижения амплитуд PSV за счет процессов постседиментационного намагничивания коррелирует с периодами вариаций, что было констатировано при проведении наших исследований. Изучая разнообразные типы донных отложений современных озер, мы столкнулись с широким временным диапазоном формирования PDRM. В настоящее время не существует надежного решения проблемы учета постседиментационного намагничивания, но определенные результаты дают, при наличии независимой априорной информации, процедуры деконволюции палеомагнитных временных рядов [Hyodo and Yaskawa, 1986]. При проведении наших палеомагнитных исследований отложений современных озер, мы оценивали временной сдвиг PDRM, используя археомагнитные определения и исторические данные в качестве опорных точек.

В озерных осадках преимущественно органогенного и хемогенного генезиса существенно возрастает роль химической или кристаллизационной намагниченности. Химическая намагниченность озерных отложений может возникнуть в процессе диагенеза осадков, а также, что крайне нежелательно, в процессе лабораторных исследований за счет окисления образцов в воздушной среде. Палеомагнитная информативность химической намагниченности озерных осадков определяется степенью ее метакронности, которая, как это показано во многих работах, в свою очередь зависит от градиентов окислительно-восстановительных потенциалов в зоне седиментации. На основе проведенных нами исследований более двух десятков разнообразных озер, мы пришли к выводу, что потенциально неблагоприятные зоны с высоковероятными диагенетическими изменениями осадков могут выявляться на рекогносцировочном этапе палеомагнитных исследований озерных отложений в процессе проведения сейсмофациального анализа бассейна осадконакопления. На этапе палеомагнитных измерений, выявление и отбраковка коллекций образцов донных отложений со значительной долей метакронной намагниченности решается применением стандартных методов оценки палеомагнитной стабильности изучаемой коллекции.

Приведенная, с позиций палеомагнетизма, характеристика современных озерных отложений показывает, что это сложный в изучении, но одновременно широко и достаточно равномерно распространенный по континентам объект палеомагнитных исследований, формирование которого продолжается и в настоящее время. Современные озерные отложения в большинстве своем находятся лишь на ранней стадии диагенеза. Поэтому, с одной стороны, эти осадки являются идеальным объектом для палеомагнитных исследований, но с другой стороны – их слабая консолидированность и химическая нестабильность предъявляют специальные требования к отбору, хранению и измерению образцов. Особенности седиментации в каждом озере определяются его морфологией (береговая линия, профиль глубин), орогидрографией области питания, гидрологическими, геологическими и тектоническими факторами, климатическим режимом. Соотноше-

ние аллотигенного и аутигенного магнитного материала в осадках также зависит от множества факторов: климатических и тектонических условий, геологического строения и состава пород области питания озера. Огромную роль в формировании носителей естественной остаточной намагниченности осадков играют химические и, в особенности, биохимические процессы, протекающие как в толще воды, так и в верхних слоях осадка. Фазы развития озера, а также фациальные и окислительно-восстановительные условия, существенно меняют в отбираемых осадках соотношение между железосодержащими минералами аллотигенного и аутигенного происхождения. Предварительное изучение бассейна осадконакопления, его истории развития и фациальных условий - необходимый этап, предваряющий отбор проб для палеомагнитных исследований. Необходимым инструментом данного этапа исследований, по нашему убеждению, может являться сейсмоакустика. Тщательный и обоснованный подход к отбираемым коллекциям образцов отложений современных озер во многом будет предопределять достоверность конечного палеомагнитного результата.

Глава 2. Сейсмоакустика в комплексе палеомагнитных исследований отложений современных озер

Вторая глава диссертационной работы начинается с рассмотрения проблемы стадийности при палеомагнитных исследованиях озерных отложений. Методологически, палеомагнитные исследования озерных отложений должны быть разбиты на следующие этапы: а) подготовительный; б) рекогносцировочный; в) этап отбора образцов и подготовки коллекций для палеомагнитных исследований; г) этап комплексных лабораторных исследований; д) этап обработки и интерпретации получаемых данных. Основная задача подготовительного этапа - сбор и анализ априорной информации, техническое обеспечение планируемых исследований. Целью рекогносцировочного этапа является трехмерное изучение всего седиментационного бассейна, выбор и обоснование местоположения точек отбора керна. Необходимым инструментом, позволяющим с необходимой детальностью и точностью получить требуемую от рекогносцировочных исследований информацию, является сейсмоакустика. Специализированные сейсмоакустические работы позволяют получать, с заданной разрешающей способностью, пространственные характеристики донных отложений водоемов, восстанавливать историю их геологического образования и постседиментационных изменений, уточнять генезис озерных котловин.

Сейсмоакустика озерных систем, зародившись на методической и аппаратурной базе морского эхолотирования, имеет ряд особенностей, обусловленных спецификой озерных бассейнов. В первую очередь эта специфика заключается в разнообразии генетических типов озерных котловин, широком диапазоне геометрических размеров и глубин водных бассейнов,

замкнутостью водных систем значительной части озер, специфическими условиями седиментации эфтрофных и олиготрофных озер. Процессы, характерные для морского осадкообразования, в физиогеографических условиях небольших озерных бассейнов сжаты во времени и в пространстве; в виду этого для озерных отложений характерны на порядок более высокая латеральная и вертикальная изменчивость. Для проведения озерных сейсмоакустических работ в комплексе палеомагнитных исследований, мы пришли к выводу об экономической и технологической целесообразности создания специализированного озерного сейсмоакустического комплекса.

При непосредственном участии автора и под его руководством, на кафедре геофизики КГУ был разработан и создан сейсмоакустический комплекс, специально предназначенный для изучения озерных бассейнов в комплексе палеомагнитных исследований. В качестве исходных параметров при его разработке были заложены следующие требования: 1) разрешенность записи - не ниже 10 см; 2) глубинность исследования различных типов озерных осадков - не менее 10 м; 3) цифровая регистрация информации; 4) портативность, небольшое энергопотребление, возможность использования надувных плотов и лодок для проведения исследований; 5) геодезическое позиционирование системы в пределах единиц метров; 6) высокая производительность - 2÷5 км акустического профиля в час; 7) возможность использования аппаратуры на различных озерах в широком диапазоне глубин. Техническое решение поставленных задач потребовало разработки и создания источников упругих колебаний, приемных устройств, системы регистрации и накопления информации, соответствующего программного обеспечения. В качестве источников упругих колебаний, исходя из требуемых энергетических и частотных параметров, а также с учетом к.п.д., было принято решение использовать пьезокерамические и индукционные преобразователи. Исходя из теоретических предпосылок, для обеспечения необходимой разрешенности волновых картин и глубинности исследований, частотный диапазон создаваемого сейсмоакустического комплекса был выбран в пределах 2÷10 кГц. Учитывая задачи последующей обработки информации, была выбрана минимально-фазовая форма излучаемых сигналов с длительностью импульсов в пределах 0,5÷1 мс и периодом следования 0,5÷2 с. Как показывал ранее накопленный опыт звуковой геолокации, глубинность исследований в десятки метров может быть достигнута при минимальной энергии излучаемого импульса в диапазоне десятков - сотен джоулей. Первоначально был рассчитан и изготовлен пьезокерамический излучатель типа дифрагирующей решетки. Конструктивно он представляет собой группу из 9 дисковых элементов керамики ЦТС (цирконат-титанат свинца), прикрепленных к поглощающему акустическую энергию основанию из полиуретана. Группирование излучающих элементов позволило существенно улучшить диаграмму направленности по сравнению с точечным источником. Опыт применения пьезокерамического излучателя на различных озерах показал высокую разрешенность получаемых акустических разрезов. Исключение составляли газонасыщенные участки донных отложе-

ний, встреченные нами на некоторых озерах (например, Плещеево, Яркуль). Вероятно, здесь мы имели дело с высокой степенью насыщения указанных разрезов пузырьками газа с различными резонансными свойствами. По приведенным в работе расчетам, резонансными свойствами в частотном диапазоне $2 \div 10$ кГц обладают газовые пузырьки диаметром $3,3 \div 0,66$ мм. Вторым типом источника упругих колебаний, разработанным и примененным в озерном сейсмоакустическом комплексе несколько позже, является индукционный излучатель - "бумер". Для данного источника нам удалось получить минимально-фазовые характеристики излучаемых импульсов при их длительности менее 1 мс и энергии 200 Дж. Конструктивно источник, включая высоковольтный генератор, размещается в небольшой забортной буксируемой гондоле. Применение подобной компоновки позволило нам избежать использования специального высоковольтного кабеля, значительно повысить к.п.д. всей компактной установки. При буксировке гондолы в рабочем состоянии, обеспечивается оптимальное положение диффузора излучателя относительно водной поверхности – на уровне $\frac{1}{4}$ видимой длины волны импульсного сигнала. Проведенные в 2002 году на Аральском море исследования с одновременным использованием двух излучателей, выявили существенное превосходство "бумера" по глубинности исследований в сравнении с пьезокерамическим излучателем при одинаковой разрешенности получаемых волновых картин.

Приемный тракт созданной сейсмоакустической аппаратуры состоит из приемного устройства, систем аналого-цифрового преобразования сигналов и их регистрации. Вся потрассовая цифровая информация в реальном масштабе времени накапливается в ОЗУ компьютера и записывается на его магнитный носитель; одновременно волновая картина выводится на экран дисплея. Интерактивная программа управления сейсмоакустической установкой обеспечивает возможность визуального контроля получаемых данных и оперативной корректировки методики работ. Разработанный сейсмоакустический комплекс работоспособен при глубинах водоема не менее 0,5 м, но в диапазоне глубин 0,5 - 1,5 метра на характер получаемой волновой картины оказывает влияние геометрия расстановки, поправка за которую в этом случае вводится при обработке материалов. Качество получаемого материала в реальных условиях во многом определяется наличием различных волн-помех, среди которых доминирующую роль играют шумы двигателя лодки и шумы, связанные с волнением водоема. Шумы двигателя нам удалось свести к минимуму за счет применения низкооборотного электрического подвесного мотора. С целью уменьшения естественного фона микросейсм, сейсмоакустические наблюдения проводились, как правило, ночью в периоды наименьшего энергообмена между атмосферой и гидросферой. Проблемы улучшения соотношения сигнал/помеха получаемых волновых картин решались нами как на этапах полевых исследований, так и в процессе обработки данных. В качестве обрабатывающей системы мы использовали предоставленный нам сотрудниками МГУ пакет программ "RadExPro+". Набор стандартных процедур, примененных нами для обра-

ботки получаемых массивов данных, включал корректировку амплитуд, различные виды фильтрации, статической коррекции и динамического анализа.

Для интерпретации получаемых сейсмоакустических разрезов озерных отложений, мы использовали основные постулаты сейсмической стратиграфии и сейсмофациального анализа, что дало возможность нетрадиционно подойти к пониманию сложных седиментационных процессов озерных водоемов. Выполненная сеймостратиграфическая интерпретация позволила нам, в частности, восстановить палеогеографические обстановки осадконакопления озер Кандрыкуль и Асликуль, выявить в пределах водоемов отложения, сформированные донными течениями (озера Увильды и Кисегач Восточного Урала), выделить зоны развития турбидитов (оз. Нарочь, Белоруссия), выявить карстовые воронки в ложе озера Плещеево (Центральная Россия), определить степень влияния неотектоники на осадочные толщи (оз. Кандрыкуль Западного Предуралья). Эффективность подобной интерпретации во многом зависела от качества используемого сейсмоакустического материала и от условий, в которых происходило формирование и развитие озера: геоморфологических особенностей территории, генезиса озера, колебаний климата. Часть озер, сейсмоакустические исследования которых проводились на рекогносцировочном этапе работ, была исключена из дальнейших палеомагнитных исследований. Так в 2001 году нами были проведены опережающие сейсмоакустические наблюдения на озерах Соленое, Глухое, Кичиер, Югидем и Раифское, расположенных в Среднем Поволжье в Республиках Марий Эл и Татарстан. Основной целью данных работ являлось получение предварительных материалов о строении озерных котловин, мощности и характере донных отложений, их генезисе и эволюции. В зависимости от ожидаемых результатов, принималось решение об отборе донных отложений и проведении их палеомагнитных исследований. Интерпретация полученных сейсмоакустических данных позволила выявить молодой (в пределах сотен лет) возраст данных озер, их карстовое происхождение и бесперспективность палеомагнитных исследований донных отложений.

Представленные в диссертационной работе материалы по применению сейсмоакустики в комплексе палеомагнитного изучения отложений современных озер доказывают необходимость данного этапа исследований, а также эффективность применения разработанного специализированного аппаратно-методического комплекса и способов интерпретации. С точки зрения методологии, сейсмоакустические исследования озерных отложений должны являться элементом рекогносцировочного этапа в палеомагнитном изучении осадков конкретного озера. Результаты сейсмофациального анализа акустических временных разрезов позволяют целенаправленно планировать все последующие палеомагнитные эксперименты.

Глава 3. Технические средства отбора озерных отложений

В данной главе рассматриваются проблемы отбора образцов донных отложений современных озер, обосновываются пути их решения и описывается разработанный под руководством автора уникальный аппаратурно-методический комплекс, позволяющий получать для палеомагнитных исследований надежные коллекции озерных осадков различного генетического типа.

Отбор непрерывных, ненарушенных колонок донных осадков современных озер и подготовка коллекций образцов, пригодных для последующих палеомагнитных исследований, имеет свою специфику, что в свою очередь обуславливает особые требования, предъявляемые к используемым техническим средствам и методике работ. Детально проанализировав существующие в мировой практике технико-методические приемы отбора образцов донных отложений, мы пришли к выводу, что с точки зрения палеомагнитных исследований, практически все используемые пробоотборные установки обладают различными, большей частью существенными, недостатками. Такая ситуация в значительной мере предопределила наше решение об авторской аппаратурно-методической разработке специализированного пробоотборного комплекса. Первый вариант конструкции телескопического донного пробоотборника был испытан на оз. Асликуль в 1991 году. Позднее модернизированный, пробоотборный комплекс КГУ в настоящее время существует в нескольких модификациях, не имеющих мировых аналогов. Он позволяет производить отбор колонок разнообразных донных отложений непрерывной мощностью до 6,5 метров без нарушения структуры осадков. Возможности конструкции позволяют довести суммарную мощность отбираемой в два приема колонки до 13 метров. Точность ориентирования получаемых коллекций образцов по склонению и наклонению составляет $1 \div 2^0$. Донный пробоотборник КГУ универсален с точки зрения глубин изучаемых водоемов, их размеров и типов отбираемых осадков. Созданная установка мобильна, использует для работы на озерах самоходную пневмоплатформу, которая, в свою очередь, легко транспортируется на берег исследуемого озера с помощью внедорожного автомобиля. Конструкция не требует в своей работе использования сжатых или сжиженных газов, источников электроэнергии, высокотехнологична в эксплуатации. Разработанный телескопический пробоотборник и методика его применения позволяют бригаде из 2-3 человек поднимать со дна озера одну колонку керна примерно за два часа. В соответствии с созданной технологией, коллекция ориентированных образцов для палеомагнитных исследований отбирается в пластиковые контейнеры с помощью специального ножевого устройства из центральной, ненарушенной деформациями части керна непосредственно после транспортировки колонки на берег. До начала измерений отобранные образцы, герметично упакованные, транспортируются и хранятся в немагнитном пространстве пермалоевых экранов.

В основе работы созданного пробоотборника лежит телескопический принцип, реализованный с помощью поршневой системы двухстороннего действия (рис. 2).

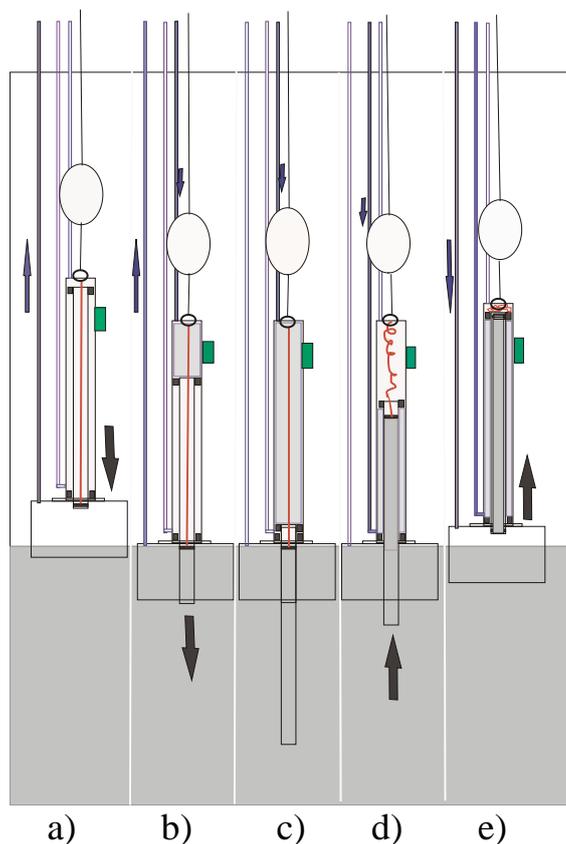


Рис. 2. Принцип и циклы работы телескопического пробоотборника КГУ: а)-цикл фиксации пробоотборника на дне водоема; б)-цикл отбора керна; с)-цикл переключения гидромагистралей; д)-цикл подъема колонковой трубы; е)-цикл отрыва отрыва пробоотборника от дна и его подъема на поверхность.

Такая конструкция обеспечивает задавливание колонковой трубы в изучаемую толщу осадков (усилием более тонны) и ее обратное извлечение после завершения процесса бурения. Для предотвращения преждевременного отрыва пробоотборника от дна исследуемого водоема в случае литифицированных осадков, донный снаряд снабжен специальной камерой (вакуумным якорем), в которой создаются отрицательные (при отборе осадков) или положительные (при отрыве снаряда) перепады давления. Конструктивно, пробоотборное оборудование состоит из опускаемого на дно водоема бурового снаряда и поверхностной аппаратуры. Универсальная конструкция донного снаряда позволяет использовать как гидравлическую, так и пневматическую поверхностную аппаратуру.

Буровой снаряд телескопической конструкции состоит из внешней тонкостенной высокопрочной немагнитной стальной трубы диаметром 105 мм, внутри которой перемещается, посредством рабочего поршня двухстороннего действия, немагнитная стальная “колонковая” труба диаметром 70 мм. Внутри колонковой трубы, у нижнего ее среза, перед началом работы располагается внутренний поршень. Этот поршень фиксирован относительно верхнего фланца бурового снаряда специальной немагнитной цепью.

Служит внутренний поршень для минимизации деформаций отбираемого керна. К нижнему фланцу бурового снаряда прикреплена цилиндрическая камера - вакуумный якорь диаметром ~800 мм, обеспечивающая фиксацию бурового снаряда на дне водоема. К верхней части бурового снаряда крепится специальный телеметрический инклинометр с системой видеоконтроля, дающий точность азимутального и вертикального ориентирования извлекаемого керна $\pm 1^0$. Все элементы донного снаряда изготовлены из немагнитных материалов. Принцип и основные циклы работы пробоотборника иллюстрирует рис. 2. Спуск и подъем донного снаряда с самоходной поверхностной пневмоплатформы осуществляется с помощью ручной лебедки - его вес составляет ~150 кг. Гидронасосы, обеспечивающие циклы работы пробоотборника, на платформе имеют дублированный механический (бензоагрегат) и ручной привод. Все циклы работы пробоотборника, включая и сам процесс отбора керна, контролируются в процессе бурения. Уникальность созданной конструкции позволяет, как это показано в работе, отбирать озерные отложения как с больших глубин (до сотни метров в случае Онежского озера), так и в переходных заболоченных зонах (оз. Галичское, Центральная Россия).

Палеомагнитные и магнито-минералогические исследования образцов озерных отложений предъявляют целый ряд специфических требований к исследуемой коллекции. Поднятый со дна водоема пробоотборником керн, предназначенный для палеомагнитных исследований, в идеале должен быть ориентированным в вертикальной и горизонтальной плоскости при сохранении первоначальной текстуры и всех свойств осадка. Создавая конструкцию донного пробоотборника, задача точного позиционирования "in situ" отбираемого керна решалась нами в двух направлениях: во-первых, это минимизация степеней свободы колонковой трубы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, и, во-вторых, обеспечение непрерывного контроля за положением колонковой трубы в процессе бурения. Надежная стабилизация колонковой трубы в процессе бурения достигнута за счет использования специальных поплавков (рис. 2), обеспечивающих вертикальность донного снаряда при его фиксации на дне с помощью камеры-присоски (цикл *a*), а также за счет специального профиля колонковой трубы, исключающего ее вращение. Непрерывный мониторинг процесса бурения обеспечивался разработанным телеметрическим инклинометром, прикрепленным к верхней части бурового снаряда.

Разработанная система подготовки коллекции образцов после доставки колонки на берег, предусматривает непрерывный послойный отбор образцов из центральной, недеформированной части керна с помощью специального режущего устройства. Созданная конструкция ножевого узла, изготовленного из высокопрочного титанового сплава, обеспечивает бездеформационное разрезание керна и его упаковку непосредственно в пластиковые контейнеры. Достигнутая нами при этом точность ориентирования образцов составляет $1 \div 2^0$. Для предотвращения окисления отобранных осадков и происходящих при этом изменений содержащихся магнитных минералов,

контейнеры с образцами герметично упаковываются и помещаются в немагнитное пространство пермалоевых экранов до начала палеомагнитных измерений.

Глава 4. Методика лабораторных исследований

В главе обосновывается оптимальный комплекс, обеспечивающий решение задач лабораторного этапа палеомагнитных исследований озерных отложений. Этап лабораторных исследований начинается с взаимной корреляции отобранных на озере колонок, затем следуют микро- и макродиагностика носителей естественной остаточной намагниченности образцов озерных отложений, магнито-минералогические и палеомагнитные исследования, определение возраста изучаемых осадков и возраста их намагниченности, дополнительные виды анализов (химический, гранулометрический и др.), интерпретация всех полученных данных.

Предварительная магнито-стратиграфическая корреляция колонок, отобранных в различных частях изучаемого водоема выполнялась по данным сканирования магнитной восприимчивости извлекаемого из пробоотборника керна. При всем многообразии факторов, определяющих накопление магнитных минералов в осадке, существуют общие закономерности изменения их концентраций в целом по водоему. Соответственно, вариации магнитной восприимчивости являются объективными качественными корреляционными признаками колонок, отобранных в разных частях изучаемого озера.

Для диагностики магнитных частиц озерных отложений, нами был выработан оптимальный комплекс магнито-минералогического анализа в совокупности прямыми методами изучения микро- и макроструктурных форм магнитных минералов. Среди прямых методов диагностики, наиболее впечатляющие результаты о происхождении и текстурных особенностях магнитных частиц позволяет получать электронная микроскопия. Как показала практика наших исследований, магнитный сепарат озерных отложений, подготовленный по стандартной методике, наряду с магнитными частицами содержит и большое количество пороодообразующих частиц, причем на снимках растрового сканирующего электронного микроскопа частицы формируют обширные кластеры (рис. 3), диагностика которых только по морфологическим признакам в большинстве случаев невозможна.

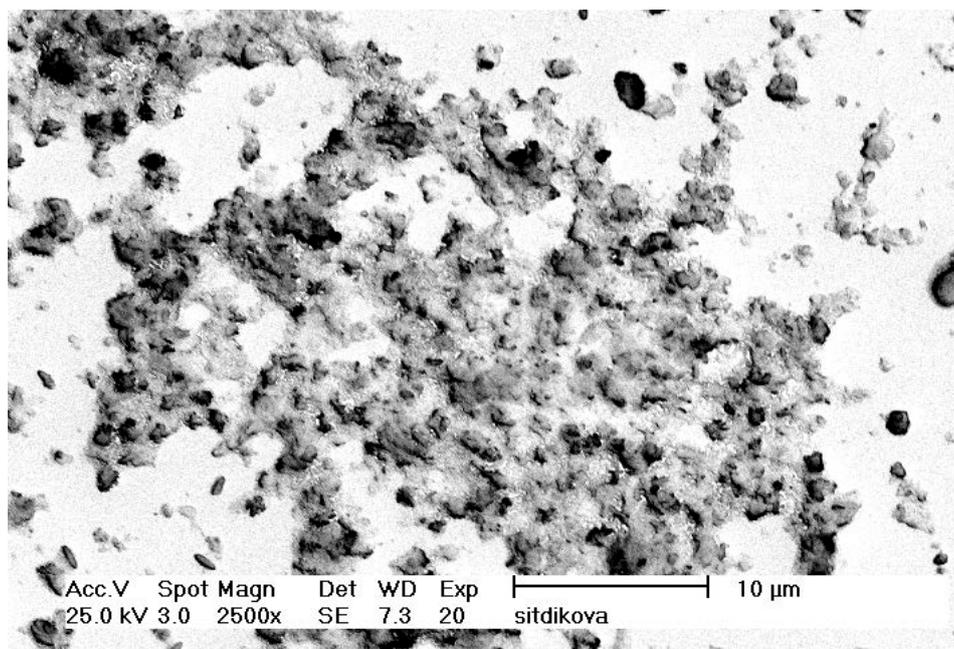


Рис. 3. Магнитный сепарат отложений Аральского моря (обр. Ch-21) в поле растрового сканирующего электронного микроскопа.

Для подобных сложных в исследовании объектов, надежные выводы о качественном составе наблюдаемых на фотографиях электронных микроскопов частиц могут быть сделаны на основе спектров микрозондового рентгеновского анализатора, что и было подтверждено полученными нами и приведенными в диссертации результатами. По энергодисперсионным спектрам мы выделяли в кластерных образованиях различные железистые минералы, частицы Fe-Ti, сульфиды железа. Подобный набор прямых диагностических методов целесообразно применять, в виду его трудоемкости, для выборочного изучения состава магнитной фракции исследуемой коллекции. Для массовой диагностики магнитных минералов озерных отложений, оптимальным является использование магнито-минералогических методов, включающих в себя термомагнитный анализ естественной и искусственной намагниченностей, гистерезисные методы, измерения магнитной восприимчивости и различных видов остаточной намагниченности. Для получения достоверных результатов, измерения должны проводиться на образцах, не претерпевших окисления в результате длительного хранения на воздухе. Изучение различных видов намагниченности образцов озерных отложений, коэрцитивных спектров, термомагнитный анализ осуществлялся в палеомагнитной лаборатории КГУ на уникальном в своем роде компьютеризованном магнитоизмерительном комплексе аппаратуры, созданном при непосредственном участии автора. Исключительно информативным с точки зрения выявления минералов-носителей NRM озерных осадков, оказался термомагнитный анализ по индуктивной намагниченности на установке дифференциального термомагнитного анализа. Используемые в ней малые размеры пробы позволяют получать термомагнитные кривые по $J_i(T)$ при большой скорости нагрева - 50 - 150 град/мин (рис. 4).

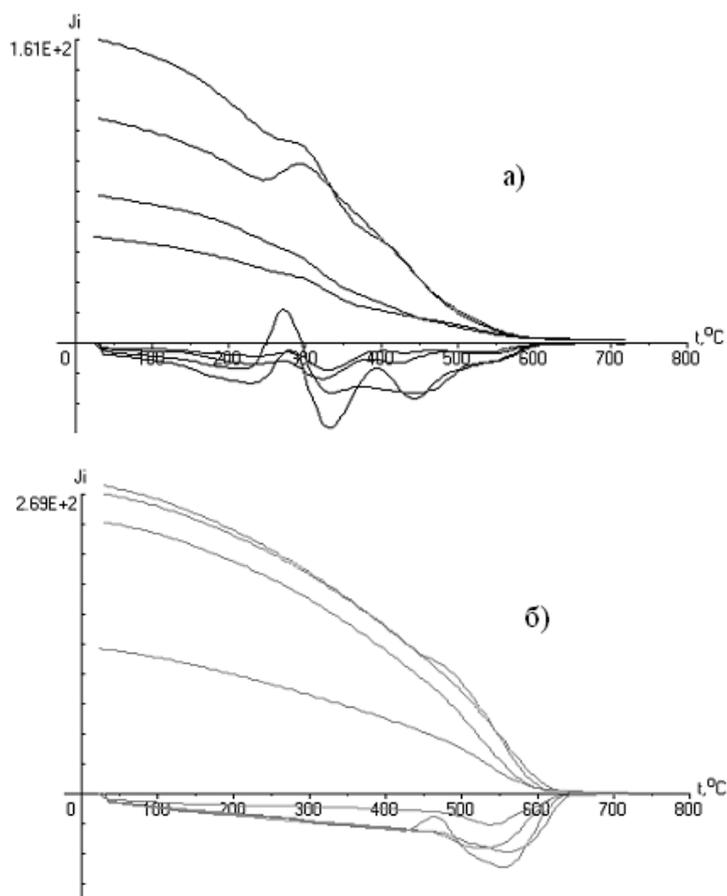


Рис. 4. Кривые ДТМА по индуктивной намагниченности образцов осадков оз. Кандрыкуль. а) – кривые первого нагрева, б) – кривые второго нагрева. В верхней части каждого графика показаны интегральные кривые, в нижней - производные dI/dt .

Очень часто на кривых первого нагрева (рис. 4,а), начиная с температуры 450°C , отмечается рост индуктивной намагниченности (в некоторых случаях – замедление скорости спада), обусловленный формированием магнетита из других железистых минералов. Наиболее четко эти особенности проявляются на дифференциальных кривых. Первая задержка спада намагниченности в температурном интервале $100\text{-}150^{\circ}\text{C}$ связана с наличием адсорбированной воды в образцах. Второй пик в температурном интервале $250\text{-}340^{\circ}\text{C}$ обычно связан с наличием в образцах сульфидов железа. Рост намагниченности в температурном интервале $400\text{-}500^{\circ}\text{C}$ характерен для всех образцов содержащих органику – при высоких скоростях нагрева происходит частичное восстановление железа и формирование магнетита. Указанные термомагнитные эффекты характерны для большинства образцов озерных осадков и существенно ограничивают возможности термомагнитного анализа по индуктивной намагниченности. Дополнительную информацию для подобных образцов мы получаем из результатов ДТМА по нормальной остаточной намагниченности насыщения, а также при измерениях изотермальной остаточной намагниченности IRM , намагниченности насыщения I_s , остаточной намагниченности насыщения I_{rs} , коэрцитивной силы

H_c образцов. Данные исследования отложений современных озер выполнялись на уникальном коэрцитивном спектрометре, созданном в палеомагнитной лаборатории КГУ. Характерным для большинства исследованных нами озерных осадков являлось то, что поле насыщения нормальной остаточной намагниченности образцов не превышало 100 мТл. Такие значения присущи таким магнитомягким минералам, как магнетит и магнитный сульфид железа (грейгит).

Измерения направлений и модуля вектора естественной намагниченности образцов озерных осадков обладают целым рядом специфических особенностей. Специфика коллекций озерных отложений - их большое влагосодержание, насыщенность органикой, наличие быстроокисляемых магнитных минералов, а также использование термопластичных пластиковых контейнеров - исключают применение температурной магнитной чистки для выделения первичной компоненты намагниченности. Для проведения магнитной чистки исследуемых коллекций озерных осадков, мы выработали следующую методику. Предварительно проводится поэтапное размагничивание 3-5 образцов из различных слоев всех колонок, отличающихся величинами магнитной восприимчивости, переменным магнитным полем спадающей до нуля амплитудой (чистка переменным магнитным полем). Размагничивание проводится с шагом 5 мТл до максимальной величины имеющейся в наличии установки переменного поля (в нашем случае - 40 мТл). По полученным в процессе магнитной чистки направлениям NRM строятся, а затем анализируются диаграммы Зийдервильда (рис. 5). Как показал опыт наших исследований, для 95% образцов направление NRM в процессе чистки практически не изменяется. Среднее разрушающее поле NRM составляет 15-30 мТл. Слабая вязкая компонента NRM удаляется при воздействии переменного поля амплитудой до 15 мТл, что обнаруживается по слабым перегибам на векторных диаграммах размагничивания.

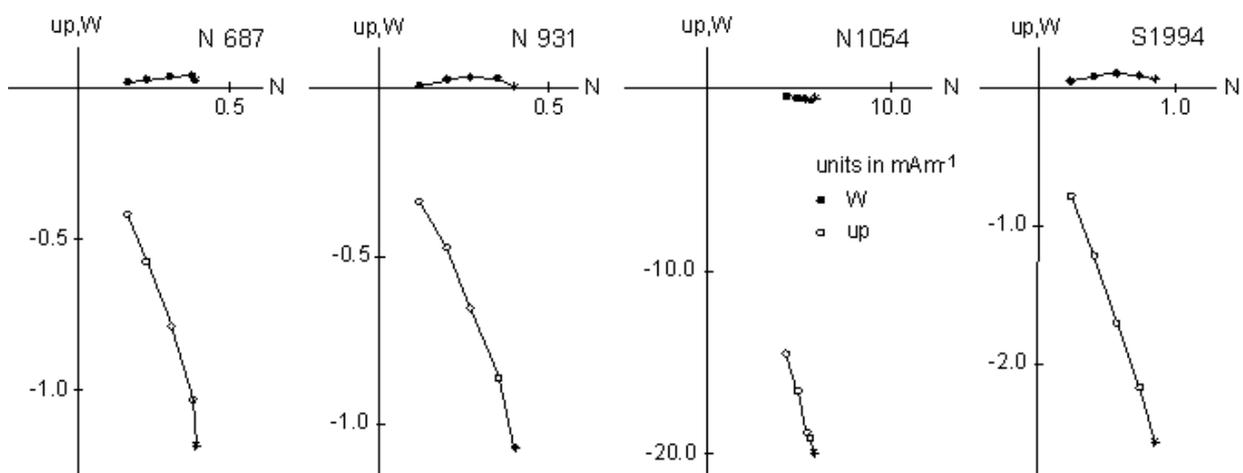


Рис. 5. Векторные диаграммы чистки переменным магнитным полем образцов озерных отложений оз. Нарочь (N 687,931,1054) и оз. Свирь (S1994).

В процессе изучения образцов с низкими значениями ЕОН ($I_n < 1.0$ мА/м), а также неконсолидированных осадков на спин-магнитометрах, мы констатировали большие дисперсии получаемых величин, и пришли к выводу о необходимости использования СКВИД-датчиков при подобных измерениях. Начиная с 1996 года, измерения ЕОН производятся нами на полученном из Швейцарии криомагнитометре ScT.

Определение возраста отобранных образцов отложений современных озер и возраста их намагниченности при палеомагнитных исследованиях является одной из неоднозначно решаемых задач. Возраст осадка в настоящее время достаточно надежно может быть определен различными абсолютными и относительными методами. Из первой группы методов в палеомагнетизме озерных отложений наиболее распространены варвометрия и радиоизотопные определения. Во второй группе лидирует палинологический метод и различные способы корреляции с опорными колонками. Наиболее достоверные абсолютные датировки осадков современных озер получают при корректно проведенных измерениях содержания радиоуглерода на современных ускорительных масс-спектрометрах (AMS- ^{14}C), позволяющих производить определения по миллиграммам органического вещества. Под корректностью измерений мы понимаем в данном случае отбраковку измерений "остаренного" углерода. В различных озерах различен вклад аллохтонного и автохтонного материала в суммарное содержание углерода в осадках; существенную роль в водоемах может играть переработанный более старый органический материал, а также процессы диагенеза органики. Терригенный материал осадков часто содержит "остаренный" углерод в виде частиц каменного угля, графита, мела. Существенным источником поставки такого углерода в современные озера является речной сток, в твердом веществе которого обычно содержится органическое вещество, карбонат кальция. Непосредственно в озерах к этим компонентам будет добавляться органическое вещество и карбонат кальция, образовавшиеся в водной толще водоема с концентрацией радиоуглерода обменного пространства, но определить долю последнего в каждом конкретном случае трудно. Абразия берегов также приводит к поставке в донные осадки органического вещества и карбоната кальция с неопределенным значением концентрации "остаренного" углерода. При наличии расчлененного рельефа в тектонически-активных районах возможно развитие оползневых процессов, также являющихся непредсказуемыми поставщиками "остаренного" углерода. Здесь мы снова приходим к выводу, что сейсмоакустика в комплексе палеомагнитных исследований отложений современных озер составляет нам дополнительную информацию об условиях осадкообразования, возможных постседиментационных процессах. Все вышеперечисленные процессы могут сильно осложнять нормальную седиментацию, и, как следствие, вызывать значительный разброс датировок одних и тех же объектов, полученных в различных лабораториях и в различные годы. Ярким примером влияния "остаренного" углерода на получаемые результаты могут служить материалы исследователей, проводивших радио-

углеродное датирование осадков Аральского моря в 1980 году [Купцов и др., 1982] - современные наши определения, выполненные по AMS-¹⁴C методике с отбраковкой образцов, содержащих "остаренный" углерод, показали значительно меньший возраст тех же самых толщ.

Корректно определенный абсолютный возраст осадков не решает полностью задачу временного масштаба выделяемых по осадкам палеогеографических вариаций в виду существующих процессов постседиментационного намагничивания осадков, о чем мы говорили в главе 1. Значительный временной сдвиг между возрастом осадка и возрастом его намагниченности - порядка 700 - 800 лет - был обнаружен нами, в частности, при исследовании коллекции образцов оз. Нарочь (Белоруссия). На данном объекте это проявилось очень резко, но тот или иной сдвиг намагниченности присущ для всех осадков. По разработанной нами методике, поправки за разность возраста осадка и возраста его намагниченности вводятся на основе использования опорных исторических сведений, археомагнитных определений и надежных палеомагнитных данных.

Глава 5. Результаты палеомагнитных исследований современных озерных отложений

В данной главе приводятся основные палеомагнитные результаты по ряду наиболее детально изученных нами озер Евро-Азиатского континента.

Исследованные в 1991-1995 гг. озера Асликуль и Кандрыкуль расположены в Западном Предуралье ($\varphi=54,5^{\circ}\text{N}$, $\lambda=55^{\circ}\text{E}$). Длительность периода изучения данных озер объясняется тем, что они служили нам своеобразным полигоном по отработке системы технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер. Условия осадконакопления озер Асликуль и Кандрыкуль сходны между собой. Сопоставляя полученные нами сейсмоакустические разрезы, данные петрофизических исследований отобранных колонок с палеоклиматической характеристикой голоцена территории Башкортостана, мы пришли к выводу, что накопление слабосортированных осадков, сильно поглощающих энергию акустических волн, происходило в периоды относительного потепления голоценовой эпохи, а частиц мелкой размерности с плотной упаковкой - в периоды похолодания. Полученные нами по радиоуглероду абсолютные датировки озерных отложений позволяют предположить, что формирование оз. Кандрыкуль началось в конце пребореального периода и почти совпало с началом господства голоценовой эпохи 10300 ± 200 лет назад, а оз. Асликуль - в конце атлантического времени (4500-5000 лет назад). Периоды потепления в голоценовую эпоху способствовали интенсивной аккумуляции аллохтонного материала, поступающего с водосбора озера, и накоплению органического вещества. Изменения в условиях осадконакопления влекли за собой определенные количественные и качественные изменения состава магнитной фракции осадков. Среди основных минералов-носителей ЕОН осадков

было выявлено наличие двух основных фаз: магнитный сульфид железа ($T_6 = 280^{\circ}\text{C} \div 310^{\circ}\text{C}$) и магнетит ($T_6 = 500^{\circ}\text{C} \div 560^{\circ}\text{C}$). Количественные вариации указанных фаз по изучаемым разрезам отражались на абсолютных величинах естественной остаточной намагниченности образцов. Проведенные после предварительной магнитной чистки палеомагнитные измерения по всем отобранным колонкам позволили, после осуществления взаимной корреляции с опорной колонкой внутри каждого озера, получить суммарные кривые изменения магнитных характеристик отобранных осадков каждого озера. Для представления изменений магнитных характеристик во временном масштабе, были использованы абсолютные датировки образцов отдельных колонок, привязанные к опорной колонке. Хорошее согласие в изменениях D и I между всеми изученными колонками в пределах одного озера, а также хорошая корреляция между двумя исследованными озерами (рис. 6), свидетельствуют о том, что наблюдаемые изменения D и I, наиболее вероятно, обусловлены вариациями элементов древнего геомагнитного поля.

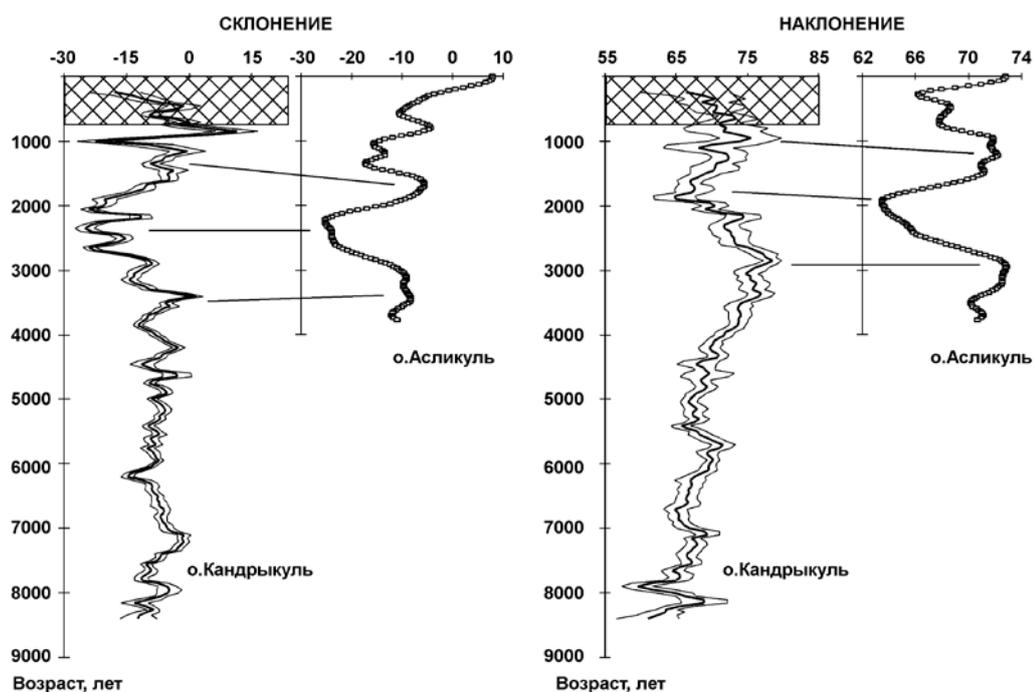


Рис. 6. Суммарные кривые вариаций склонения и наклонения по осадкам озер Асликуль и Кандрыкуль, представленные во временном масштабе.

Для проверки полученных нами результатов, т.е. выделенных PSV, мы использовали имеющиеся для данного региона инструментальные (обсерваторские) наблюдения, а также археомагнитные данные. Результаты сравнения палеомагнитных данных по отложениям оз. Асликуль, обсерваторских и археомагнитных измерений представлены на рис. 7.

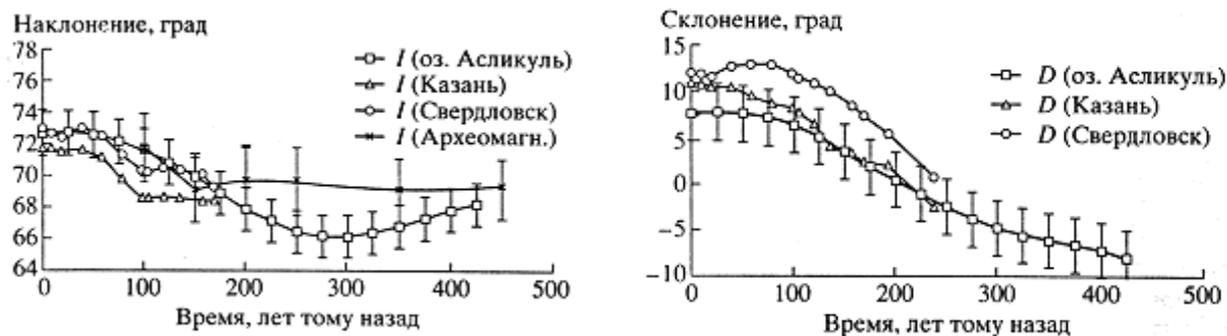


Рис. 7. Результаты сравнения палеомагнитных данных оз. Асликуль с обсерваторскими наблюдениями и археомагнитными определениями.

В целом наблюдается достаточно неплохое совпадение всех указанных данных по наклонению; различие между осредненными инструментальными наблюдениями и палеомагнитными данными составляет не более 2° . Расхождение между палеомагнитными и археомагнитными данными в XVII -XV веках н.э. составляет $3-4^{\circ}$, причем, палеомагнитные наклонения ниже археомагнитных. Различие между палеомагнитными определениями и инструментальными измерениями склонения достигает 5° . Однако, если использовать средние величины склонений по двум обсерваториям, то различие не превышает 3° . В обоих случаях тренд по инструментальным наблюдениям и палеомагнитным определениям совпадает. Таким образом, можно говорить о согласии всех видов данных, как по склонению, так и по наклонению, что, в свою очередь, свидетельствует о достоверности записей палеовековых геомагнитных вариаций в осадках данных озер, а также, как минимум, о корректных определениях абсолютного возраста осадков в верхней части колонок.

Мы провели изучение спектральных характеристик полученных по данным озерам временных рядов. Палеовековые вариации наклонения, зафиксированные в донных отложениях озер Асликуль и Кандрыкуль, отличаются регулярностью, и по данным спектрального анализа методом максимальной энтропии, имеют следующие периоды: ~ 2500 лет, $\sim 1400-1500$ лет, ~ 750 лет и ~ 550 лет. Вариации склонения также имеют сложную структуру, здесь выделяются колебания с периодами $3700-4000$ лет, $\sim 1400-1500$ лет, ~ 800 лет, и ~ 550 лет.

Озера Свирь и Нарочь были исследованы нами в 1997 году. Оз. Нарочь ($54^{\circ}51'N$, $26^{\circ}51'E$) и оз. Свирь ($N 54^{\circ}47'$; $E 26^{\circ}30'$) расположены в северо-западной части Белоруссии в зоне типичного рельефа, сформированного Валдайским оледенением. С геологической точки зрения, озеро Нарочь представляет интерес как внутриконтинентальный бассейн интенсивного карбонатного накопления. Весь осадок озера сильно известковистый, в основном он представлен известковистой гиттией. Осадок в оз.Свирь представлен сапропелем с высоким содержанием органического

материала. Проведя комплексные магнито-минералогические исследования отобранных образцов, мы пришли к выводу, что первичными магнитными минералами исследуемых осадков являются магнетит и, вполне вероятно – небольшие количества магнитного сульфида железа (грейгита). Выполненные, в соответствии с разработанной методикой, палеомагнитные измерения по каждой отобранной колонке позволили построить соответствующие кривые и провести их взаимную корреляцию для обоих озер - Свирь и Нарочь. На рис. 8 приведены вариации склонения и наклонения характеристической намагниченности (ChNRM) для всех исследованных колонок. Наблюдается хорошая корреляция направлений ChNRM для всех колонок указанных озер. Значительное различие в скоростях накопления осадков затрудняет корреляцию колонок, но наличие абсолютных датировок и тщательное сопоставление кривых изменения магнитной восприимчивости позволяют надежно прокоррелировать все колонки.

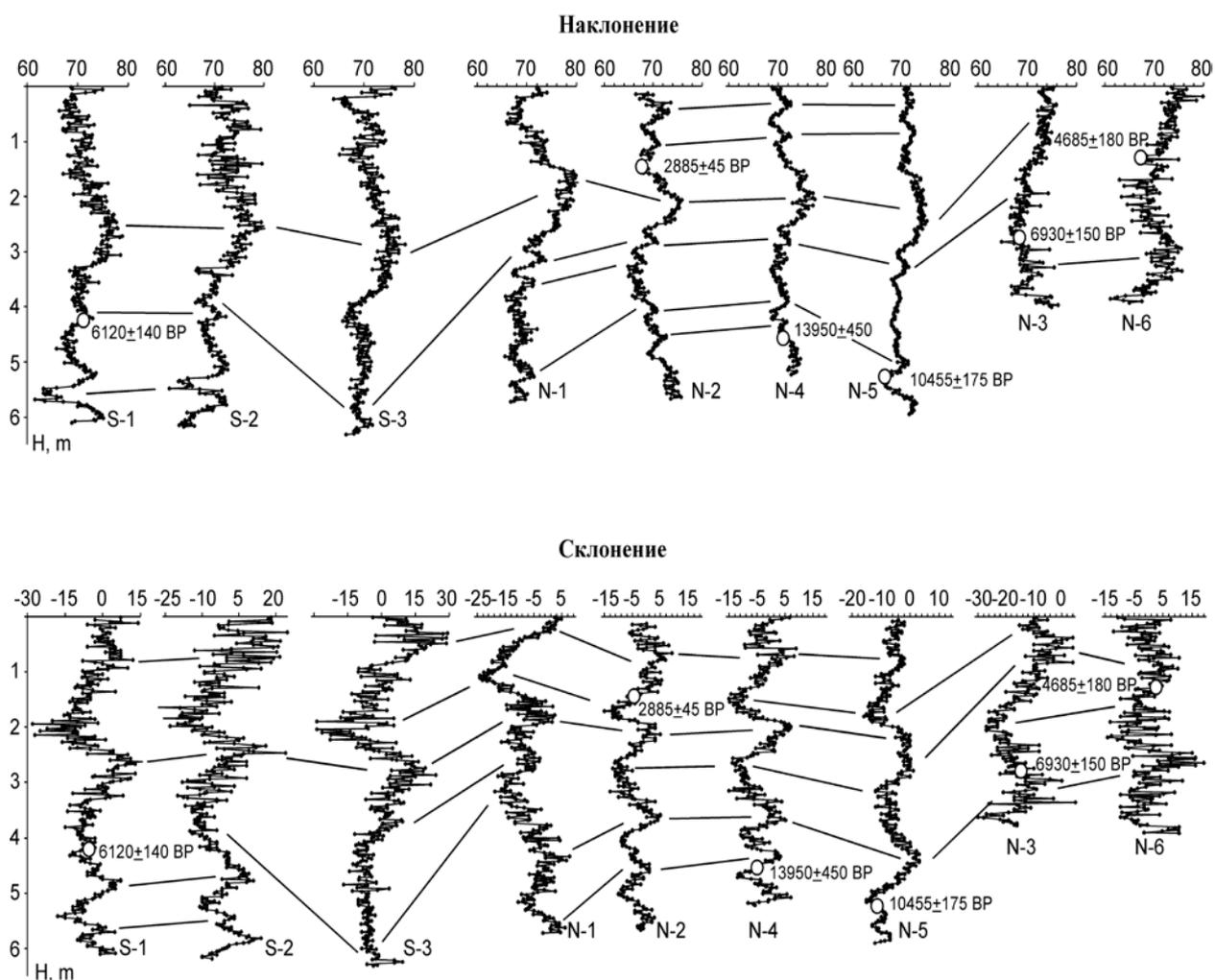


Рис. 8. Вариации склонения и наклонения в колонках оз. Нарочь (N-1 – N-6) и оз. Свирь (S-1 – S-3).

Используя все коррелятивные параметры (магнитная восприимчивость, абсолютные датировки, кривые изменения склонения и наклонения

ChNRM), колонки по оз. Нарочь и оз. Свирь были просуммированы в масштабе глубин колонки N-2. В результате нами были получены кривые изменения склонения и наклонения магнитного поля по отложениям современных озер данного региона (Белоруссия). Для представления изменений склонения и наклонения по каждому озеру во временном масштабе, были использованы имеющиеся абсолютные датировки, а также корреляции с известными археомангнитными и палеомагнитными данными по ближайшим регионам. Первоначально мы произвели корреляцию с археомангнитными кривыми [Daly, De Goff, 1996] по Центральной Европе (Венгрия, Болгария, Украина и Молдавия - рис. 9.

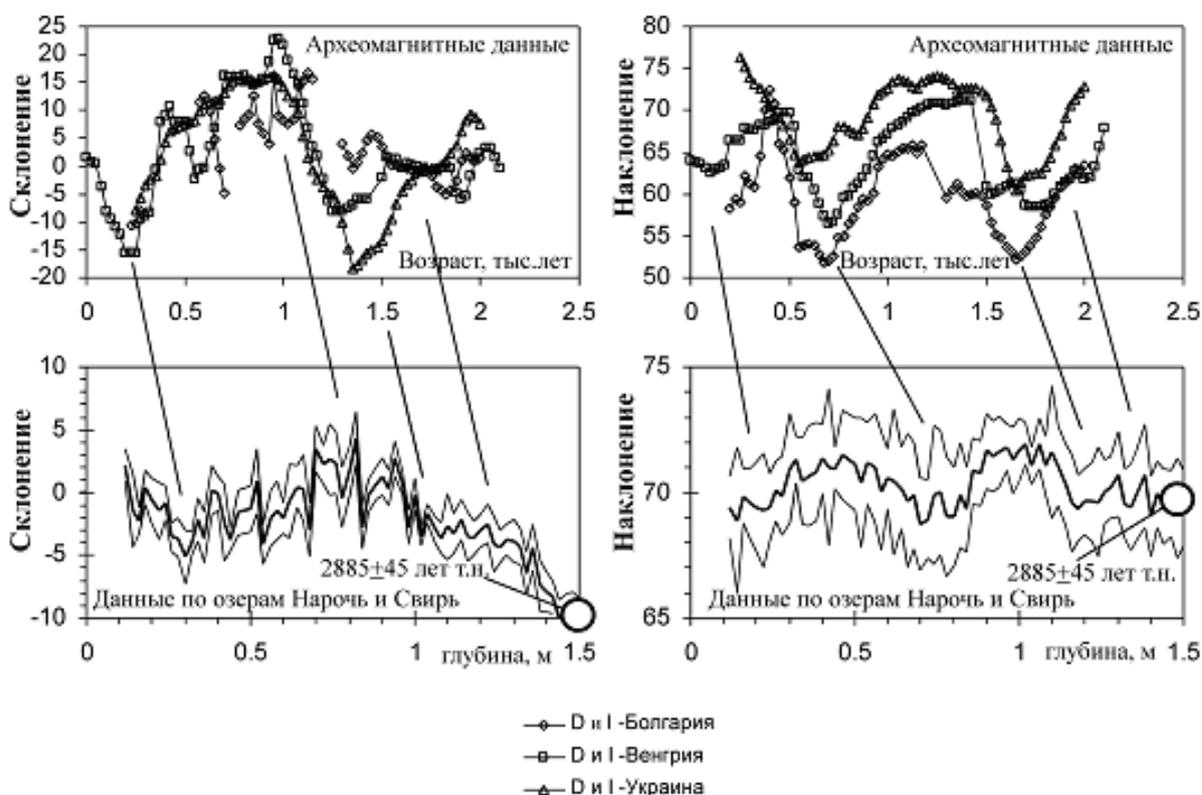


Рис. 9. Корреляция археомангнитных и палеомагнитных данных отложений оз. Нарочь и оз. Свирь.

Приведенный рисунок свидетельствует о значительном сходстве записи в осадках озер Нарочь и Свирь с археомангнитными данными. Необходимо отметить, что датировка ^{14}C на глубине 1.42-1.5 м дает возраст осадка 2885 ± 45 лет т.п., в то же время по корреляции с археомангнитными данными возраст намагниченности составляет около 2100-2200 лет. Наблюдаемая разница может быть связана частично с явлением постседиментационного намагничивания осадков, о чем мы говорили в главе 1. Для данного озера, сдвиг между возрастом осадка и возрастом намагниченности составляет около 700-800 лет или, в масштабе отобранной колонки, 40-50 см. Такая большая величина сдвига обусловлена в данном случае тем, что осадок преимущественно карбонатный и его фиксация, а также фиксация намагниченности происходит на значительной глубине. Мы пришли к выводу, что

для данного озера оценки возраста осадка по ^{14}C не могут быть напрямую использованы для построения кривых изменения геомагнитных параметров во времени. На данном объекте это проявилось очень резко, однако, по-видимому, это присуще для всех карбонатных осадков. Первое приближение поправки за разность возраста осадка и возраста его намагниченности можно получить используя в качестве опорных археомагнитные определения для прилегающих районов. Однако археомагнитные данные покрывают только последние 2000 лет, что явно недостаточно для нашего случая. Поэтому мы остановились на использовании палеомагнитных опорных данных о вариациях склонения и наклонения, полученные по ближайшим регионам. В качестве ближайшего региона с надежными данными о палеогеомагнитных вариациях геомагнитного поля, зарегистрированных в донных отложениях озер, мы выбрали Финляндию, где были получены записи по нескольким озерам, датировка которых выполнена путем подсчета варв [Ojala and Saarinen, 2002.]. На втором этапе мы провели сопоставление записей по озерам Нарочь и Свирь с Британской озерной кривой [Turner and Thompson, 1982]. Хорошая корреляция приведенных записей свидетельствовала о значительном сходстве вариаций склонения и наклонения, за исключением амплитуд вариаций. Сделав допущение, что фазовый сдвиг основных колебаний склонения и наклонения между Беларуссией и Финляндией (а также – даже с Великобританией) достаточно мал, мы использовали возраст характерных особенностей кривых указанных регионов для временной привязки естественной остаточной намагниченности в осадках Беларусских озер. Таким образом, для создания временного масштаба в колонках осадков Беларусских озер мы использовали все полученные данные: абсолютные датировки осадков, возраст пиков PSV по археомагнитным определениям, озерные данные по Финляндии и по Великобритании. На рис. 10 представлены зависимости указанных возрастов и глубины осадка в Беларусских озерах.

Сдвиг между возрастом осадков, залегающих на данной глубине, и возрастом намагниченности составляет от 700 до 2500 лет. Выявленный сдвиг обусловлен многими причинами, среди которых главными являются следующие:

1. Наличие PDRM в осадках Беларусских озер. В то же время, сдвиг за счет наличия посториентационной намагниченности существует во всех озерных данных. Вероятно, он менее значителен для осадков оз. Nautajarvi, так как осадок там более терригенный и более крупнозернистый, в виду чего литификация и фиксация намагниченности происходят на меньшей глубине. В археомагнитных данных фиксация намагниченности синхронна возрасту объекта.

2. Завышение радиоуглеродного возраста осадков за счет "эффекта жесткой воды" [Deevey, 1954; Stiller, 2001]. Действительно, осадки оз. Нарочь представляют собой яркий пример современного осаждения карбонатов, поэтому вероятно наличие "остаренного" углерода в органическом

веществе осадков. Осадки оз. Свирь существенно отличаются от осадков оз.

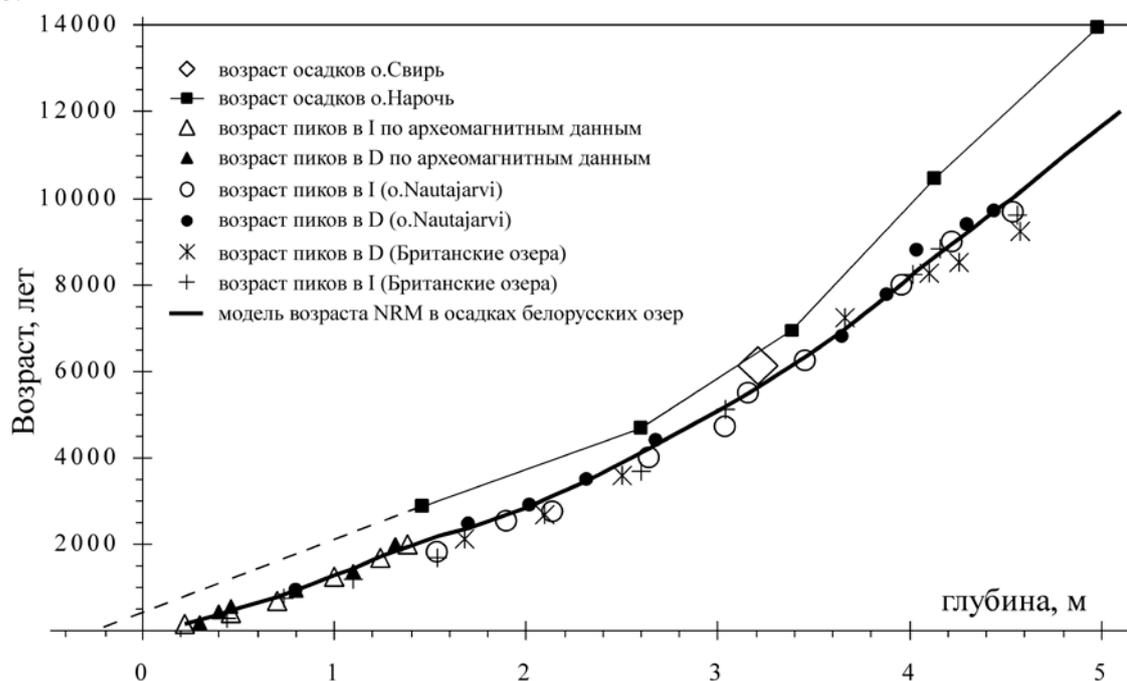


Рис. 10. Зависимость возраста осадков и возраста их намагниченности от глубины для оз. Нарочь.

Нарочь тем, что они менее карбонатные. К сожалению, мы имеем только одну датировку для осадков оз. Свирь, но даже эта точка (отмечена ромбиком на рис. 10) показывает, что различие между возрастом намагниченности и возрастом осадка значительно больше для отложений оз. Нарочь. Осадки оз. Свирь на глубине 4.22-4.30 м имеют возраст 6120 ± 140 лет. Подобные же особенности палеовековых вариаций записаны в осадках оз. Нарочь, имеющих возраст ~ 6500 лет. Полученный по другим озерным палеомагнитным данным возраст тех же особенностей палеовековых вариаций составляет ~ 5600 лет. Таким образом, полагая, что фазы палеовековых вариаций в Белоруссии и Финляндии отличаются не столь значительно, мы можем оценить сдвиг между возрастом осадка и возрастом намагниченности в донных отложениях озер Нарочь и Свирь: ~ 1000 и $\sim 600-650$ лет соответственно (выше было показано, что сравнение палеомагнитной записи по отложениям оз. Нарочь с археомагнитными данными дает различие между радиоуглеродным возрастом осадка и возрастом намагниченности порядка 700-800 лет). Вероятнее всего, что различие величин указанного параметра в озерах Нарочь и Свирь обусловлено "эффектом жесткой воды" в осадках оз. Нарочь, а величина этого эффекта составляет порядка 350-400 лет для возраста 6120 ± 140 лет. Таким образом, в озерах с высоким содержанием гидрокарбонатов радиоуглеродный возраст осадков может быть завышен.

3. Различный возраст морфологически похожих экстремумов PSV на кривых для различных регионов (Белоруссия, Великобритания и Финляндия). Действительно возникновение указанного различия возраста осадков и возраста намагниченности, представленное на рис. 10, частично может

быть объяснено за счет этого явления. Если предположить наличие западного дрейфа всех морфологических особенностей геомагнитного поля со скоростью ~ 0.1 град/год, то этим можно объяснить разницу ~ 250 лет между одинаковыми особенностями PSV между Британскими и Белорусскими записями.

4. Датировки всех озерных PSV кривых содержат ошибки. Например, некоторые авторы [Snowball, and Sandgren, 2002] считают, что датировки Британской кривой древнее, чем должны быть на самом деле именно за счет того, что использовался весь углерод породы (не только органический). Датировки, выполненные по анализу микрослоистости пород также могут содержать ошибки [Ojala and Saarinen, 2002].

Таким образом, мы уверенно можем констатировать, что систематически завышенный возраст экстремумов склонения и наклонения в Белорусской PSV кривой обусловлен влиянием "эффекта жесткой воды" и наличием PDRM в осадке. Последнее, по-видимому, имеет большее значение из-за очень специфических свойств (консистенция и состав) осадка оз. Нарочь. В итоге для построения записей PSV по Белорусским озерам во временном масштабе мы использовали осредненную кривую зависимости возраста осадков и возраста их намагниченности от глубины. Полученные подобным образом суммарные кривые вариаций склонения и наклонения по Белорусским озерам Нарочь и Свирь во временном масштабе представлены на рис. 11.

Спектральный анализ временных рядов изменения D и I осадков данных озер методом максимальной энтропии и методом БПФ позволил выделить в колебаниях склонения и наклонения несколько групп периодов. В первую группу относятся колебания (тренд) с периодами 8000-11000 лет. Точные периоды этих колебаний не удается определить т.к. они имеют величины, близкие к величине ряда. Например, в изменениях наклонения по оз. Свирь обнаруживается период ~ 9050 лет, по оз. Нарочь - ~ 10000 лет, а в изменениях склонения по оз. Свирь период составляет ~ 10750 лет, по оз. Нарочь - ~ 80000 лет. Вторая группа содержит колебания с периодами около 3000-4500 лет: в склонении по оз. Свирь - 3050 лет, по оз. Нарочь - 3500 лет; в наклонении по оз. Свирь - 3500 лет, по оз. Нарочь - 4500 лет. Следующая группа периодов обнаруживается в спектре и наклонения и составляет ~ 1700 -1900 лет. В четвертую группу мы отнесли периоды от 1000 лет до 1400 лет, обнаруживаемые в обоих параметрах. Эти колебания имеют максимальные амплитуды в спектре зарегистрированных PSV. В последнюю (пятую) группу нами включены колебания с периодами менее 1000 лет: ~ 950 , ~ 850 , ~ 650 , ~ 500 лет и менее. Подобные группы периодов колебаний элементов геомагнитного поля за последние несколько тысяч лет были обнаружены ранее по мировым археомагнитным данным и палеомагнитным исследованиям отложений современных озер в Западной Европе, Северной Америке и других регионах [Creer, 1983 и др.]. Это еще раз свидетельствует о реальности записи PSV в донных отложениях озер

Свирь и Нарочь. Практически все эти колебания отмечаются на кривых изменения склонения и наклонения визуально.

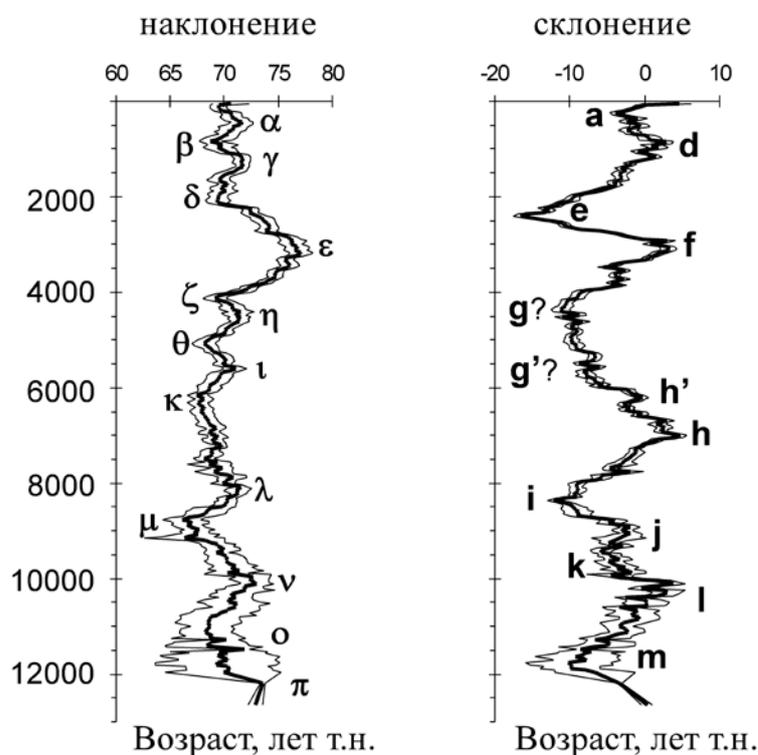


Рис. 11. Суммарные кривые вариаций склонения и наклонения по Белорусским озерам Нарочь и Свирь во временном масштабе. Буквами обозначены экстремумы вековых вариаций по корреляции с Британской кривой (Turner and Thompson, 1982).

Еще одна особенность PSV зарегистрированных в отложениях Белорусских озер – это резкое занижение амплитуд пиков на кривых изменения склонения и наклонения по сравнению с другими записями (рис. 8, 9, 11). На амплитуду пиков влияет наличие постседиментационной намагниченности в осадках, как было указано выше. Сравнивая амплитуды вариаций, можно сделать следующие выводы:

1. Для вариации с периодом около 1000 лет, хорошо проявляющихся в склонении и наклонении по данным археомагнитных измерений, но в особенности - в наклонении, видимый размах колебаний составляет 22° (по наклонению) и около 40° по склонению. В то же время для этой же вариации, записанной в донных отложениях озер Нарочь и Свирь, размах составляет 4° (по наклонению) и 8° (по склонению). Т.е. амплитуды вариаций с периодом порядка 1000 лет, записанные в осадках, в 5 раз меньше, чем по археомагнитным данным

2. Вариации с периодами порядка 400-600 лет, визуально обнаруживаемые на археомагнитных кривых, имеют размах порядка $10-15^{\circ}$ (не более), на кривых записанных в осадках озер Нарочь и Свирь имеют едва за-

метные на фоне шума амплитуды ($1-2^0$). Т.е. вариации с меньшими периодами ослаблены более чем в 5-10 раз.

Таким образом, мы наблюдаем сильное сглаживание вариаций склонения и наклона, обусловленное наличием постседиментационного намагничивания. Подобное сравнение данных было проведено авторами работы [Turner, Thompson, 1982] и они приняли коэффициент 2 для амплитуд всех вариаций, что в принципе неверно. Можно предположить, что даже при значительном сдвиге между возрастом осадка и средним возрастом намагниченности (как наблюдается в нашем случае) некоторые вариации, например – с периодом более 2000 лет, могут вообще не искажаться. Используя одинаковый коэффициент для всего ряда, мы получим искусственное увеличение амплитуд длиннопериодных вариаций, не исправив при этом амплитуды высокочастотных изменений. Корректная поправка амплитуд вариаций склонения и наклона может быть получена при известных изменениях скорости накопления осадков, его состава и зависимости глубины фиксации намагниченности. Мы произвели количественную оценку степени сглаживания полученных нами PSV по озерам Нарочь и Свирь, сопоставив амплитуды вариаций геомагнитного поля, записанных в отложениях Белорусских озер, и тех же самых (по морфологии и возрасту) особенностей PSV, полученных по другим объектам: историческим данным, археомагнитным записям по Западной и центральной Европе [Daly, 1996], а также записям в осадках Британских озер [Turner, Thompson, 1982], озер Северной Швеции [Snowball and Sandgren, 2002], озер Финляндии [Ojala and Saarinen, 2002], озер Западного Эйфеля (Германия) [Stockhausen, 1998]. В результате мы получили, что в записях Белорусских озер амплитуды PSV занижены по сравнению с реальными до 5 раз, а по сравнению с записями в осадках других озер - в 2 раза. Это обусловлено, по-видимому, специфическими свойствами осадка Белорусских озер (высокое содержание карбонатов).

Палеомагнитные исследования современных отложений Аральского моря выполнялись в рамках международного проекта Aral-1030 "CLIMAN", финансируемого по гранту INTAS. Общей целью всего проекта являлось изучение изменения климата в регионе и условий обитания за последние тысячелетия. Аральское море является внутриконтинентальным водоемом с аридным типом седиментогенеза, подобно Азовскому и Каспийскому морям. К 1995 году море потеряло три четверти водного объема, а площадь поверхности сократилась более чем наполовину. Значительные колебания уровня Аральского моря происходили и в прошлые исторические эпохи. На полученных нами сейсмоакустических временных разрезах достаточно четко выделяются несколько сейсмофациальных комплексов осадочных пород, формирование которых связано с колебаниями уровня Арала. Неоднократные, резкие изменения условий седиментогенеза - от стадии слабосоленых вод до сульфатной стадии - приводили к замене преимущественно терригенной седиментации на преимущественно хемогенную.

Данные изменения нашли свое отражение в амплитудно-частотных характеристиках волновых пакетов на полученных временных разрезах, что и позволило нам произвести надежный сейсмофашиальный анализ. Генетически образование минерального комплекса донных отложений Арала происходило за счет поступающих продуктов размыва палеогеновых и меловых пород, слагающих абразионные берега, золотой взвеси и минералов химического и биогенного происхождения. Как было выявлено в результате наших сейсмоакустических исследований, наиболее интенсивно накопление осадочного материала происходило в западном глубоководном желобе Аральского моря, частью которого является исследованный нами залив Чернышева. Всего в полевой сезон 2002 года в трех заливах Аральского моря донным пробоотборником КГУ было отобрано 9 колонок мощностью от 3 до 6,2 м. Для диагностики магнитных минералов осадков, в соответствии с выработанной нами методикой, были использованы методы электронной микроскопии и комплексные магнито-минералогические исследования. Высокие значения насыщающего поля - почти 150 мТл для 95% насыщения IRM - кривых индуктивной намагниченности свидетельствовали о значительной доле парамагнитных (PM) и суперпарамагнитных (SP) частиц в исследуемых осадках. Это типично для магнетита и магнитных сульфидов железа, которые обычно наблюдаются в современных осадках [Snowball, 1994]. Термомагнитные кривые, полученные в больших полях (в нашем случае 200 мТл) подтвердили данные выводы. Радиоуглеродные датировки (AMS-¹⁴C) были получены по органическому углероду, выделенному из осадков изучаемых колонок в Высшей Технической Школе (ETH) Швейцарии (г. Цюрих). Вычисленные значения возраста осадков были скорректированы с помощью калибровочной программы OxCal [Bronk Ramsey, 1995].

Анализ полученных датировок показал, что при использовании для радиоуглеродного датирования органического материала, распыленного в общей массе проб, наблюдается явное влияние "остаренного" углерода на полученные результаты ("эффект жесткой воды"). Данные образцы были нами отбракованы. Оставшиеся девять полученных датировок позволили заключить, что показатель осадения сильно изменяется во всех отобранных колонках. Например, в самых верхних 1.3 метрах колонки Ag-9 показатель осадения составляет почти 3 мм/год, в средней части (1.30 - 4.50 м) значение очень высокое - приблизительно около 16 мм/год, в нижней части колонок показатель меняется от ~1 мм/год (интервал 4.50- 4.95 м) до ~6 мм/год (интервал 4.95-5.95 м). Низкие значения показателя осадения связаны с сухими периодами и снижением водного уровня, что подтверждается возрастающей концентрацией гипса в осадках.

Используя данные об абсолютном возрасте осадков, мы пересчитали полученные вариации склонения и наклонения NRM во временной масштаб. Аналогично данным по другим исследованным нами и выше описанным озерам, временные характеристики геомагнитного поля по осадкам Аральского моря (45.98°N; 59.24°E) могут быть проанализированы с пози-

ций критериев внешней сходимости. Для проведения подобного анализа (рис. 12), мы использовали записи PSV в осадках оз. Асликуль (55.25°N, 54.7°E), описание которых было сделано выше, а также исторические данные, представленные в работе [Jackson et al., 2000].

Корреляция с ранее нами же полученными данными оз. Асликуль вполне корректна, т.к. последние были успешно прокоррелированы с записями других европейских озер [Frank et al., 2002]. Как можно видеть на рис. 12, вариации склонения и наклонения за последние 400 лет, зафиксированные в осадках обоих водоемов, неплохо коррелируют с осредненными историческими данными по этому региону. В то же время, амплитуды вариаций по осадкам оз. Асликуль существенно ниже исторических данных. Кроме того, необходимо отметить, что древнее 350 лет амплитуда наклонения по историческим данным, по-видимому, нереально высокая. Это может быть обусловлено интерполяцией данных – реальных исторических данных на это время в исследуемых регионах нет (устное сообщение Andy Jackson). Вариации склонения, наблюдаемые в записях Аральского моря и оз. Асликуль, очень сходны даже в мелких деталях. В то же время, экстремумы D_3 , d_4 , D_5 , выделяемые в записях оз. Асликуль, по возрасту древнее аналогичных экстремумов Аральского моря (рис. 12). Записи вариаций наклонения на данных объектах также хорошо коррелируют между собой. Заметное возрастное расхождение экстремума i_1 , наблюдаемое между данными оз. Асликуль и историческими данными, обусловлено, вероятно, неточностями датировок озерных отложений или постседиментационной намагниченностью – возраст вариации по озерной кривой древнее исторических данных. Возраст аналогичных экстремумов в вариациях наклонения, записанных в осадках Аральского моря и оз. Асликуль практически совпадает, за исключением пика I_4 , что, вероятно, обусловлено зашумленностью записи по Аральскому морю.

Полученные в рамках настоящей работы данные по палеовековым геомагнитным вариациям были сопоставлены с известными записями PSV в осадках современных озер Западной Европы (рис. 13а, б). Основные результаты этих корреляций заключаются в следующем:

1. Достижимая точность датирования ChRM в осадках современных озер не позволяет провести анализ дрейфа особенностей PSV.
2. Особенности записи PSV осадках обусловленные наличием процессов постседиментационного намагничивания не позволяют корректно реконструировать амплитуды вариаций элементов древнего геомагнитного поля.
3. Качественный анализ морфологии вариаций склонения и наклонения ChRM, а также корреляция лимномагнитных записей демонстрирует как наличие длиннопериодных («дипольных») изменений поля, так и короткопериодных («недипольных») вариаций, обладающих рядом региональных особенностей.
4. Установлено, что вариации с периодом ~600-900 лет прослеживаются на протяжении всего голоцена и, по-видимому, свидетельствуют о

наличии регулярных магнетогидродинамических колебаний во внешней части жидкого ядра Земли.

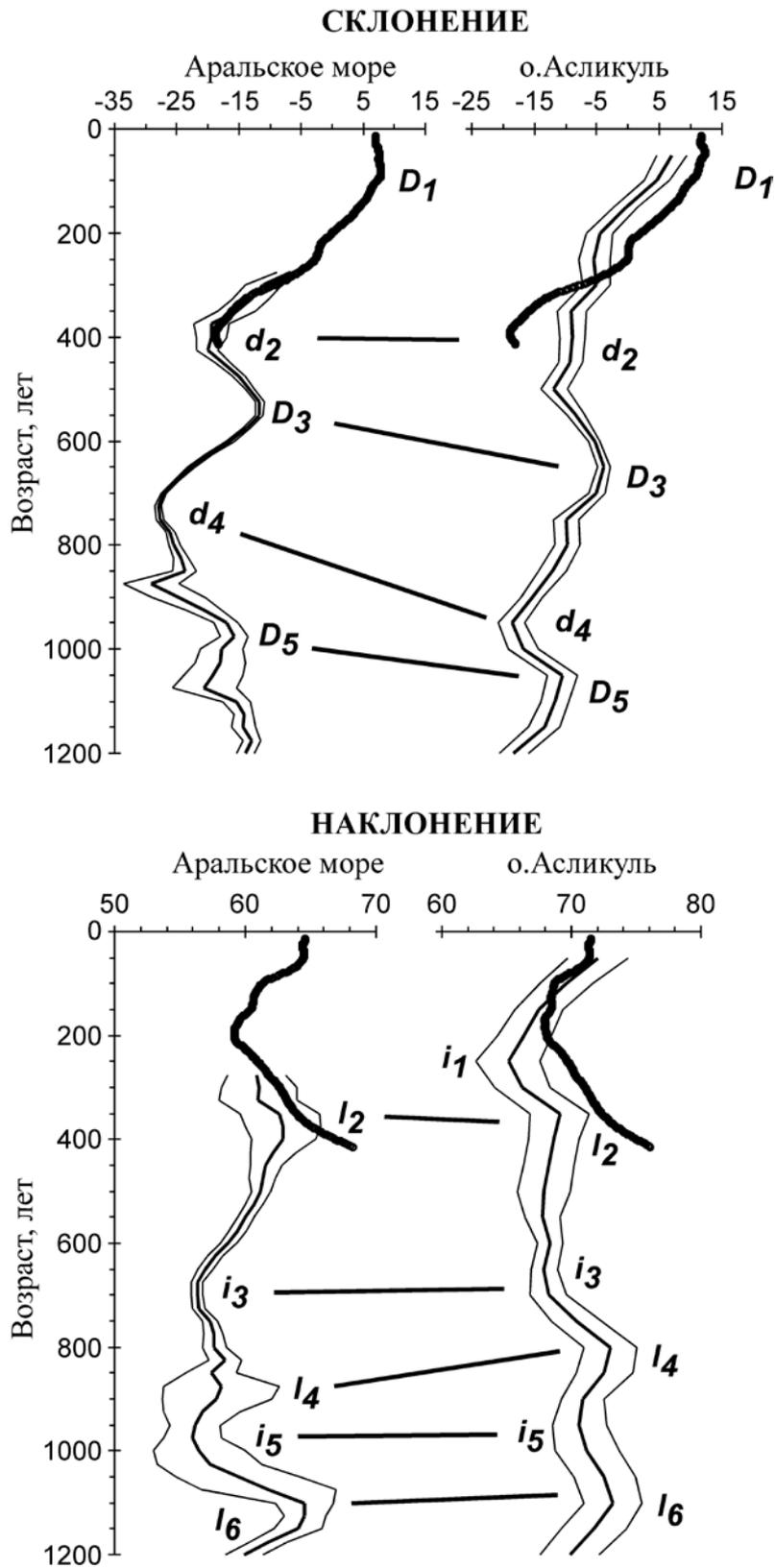


Рис. 12. Сравнение записей PSV в осадках Аральского моря, оз. Асликуль и данных прямых наблюдений (жирные линии, (Jackson et al., 2000)).

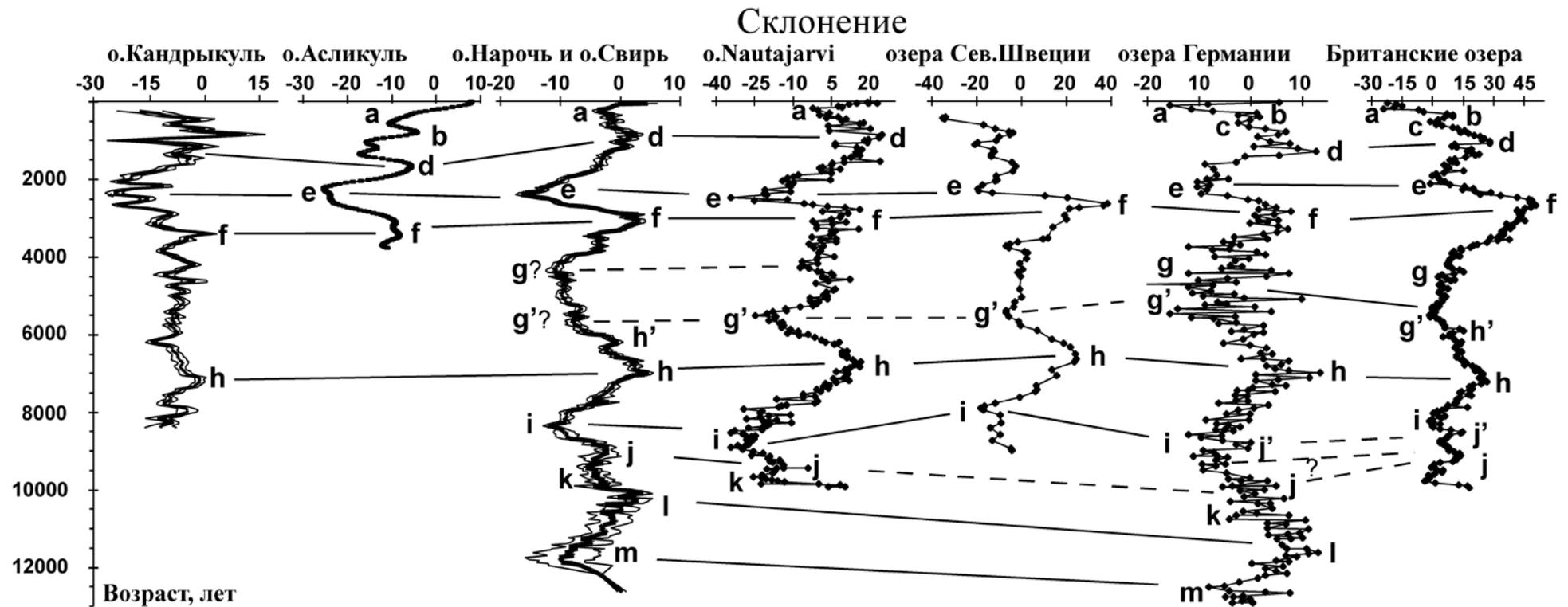


Рис.13а. Корреляция вариаций склонения геомагнитного поля в Европе за последние 10-12 тысяч лет по результатам палеомагнитных исследований озерных отложений. Наряду с результатами полученными автором, приведены данные по Финляндии [Ojala and Saarinen, 2002], Швеции [Snowball and Sandgren, 2002], Германии [Stockhausen, 1998], Великобритании [Turner and Thompson, 1982].

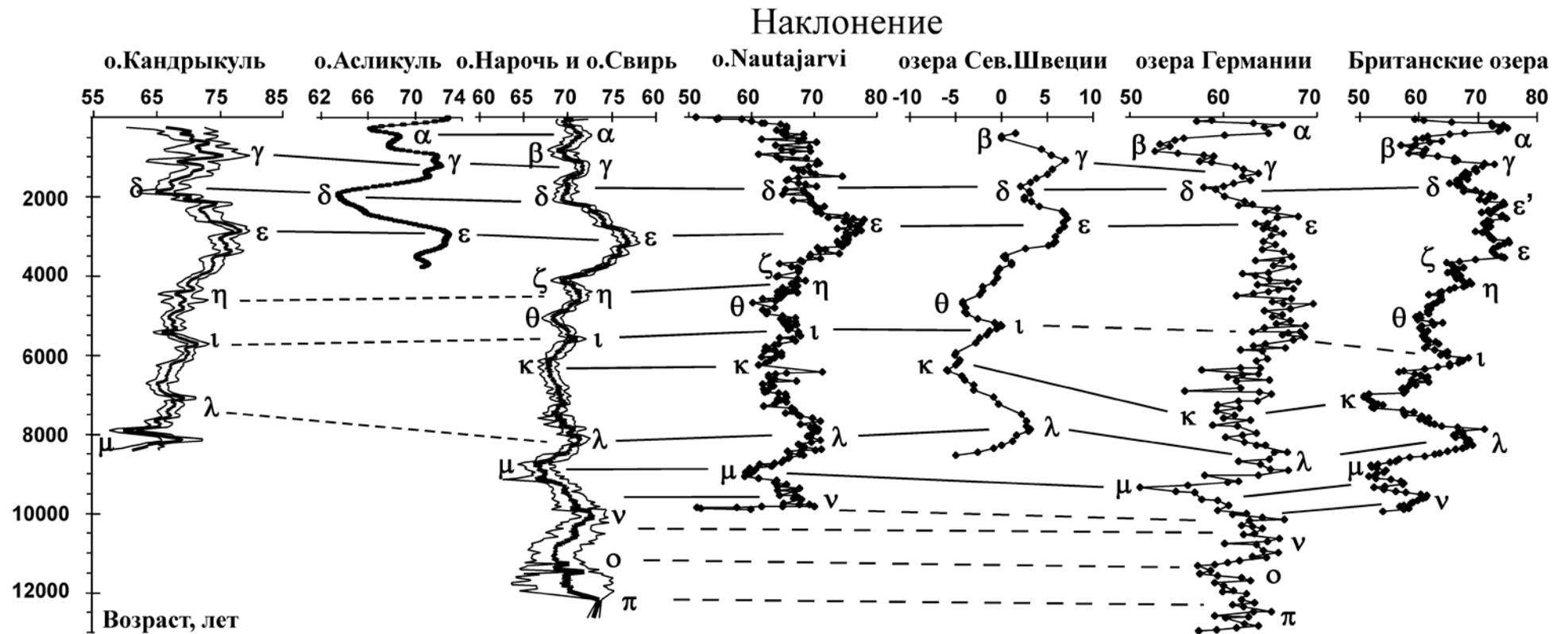


Рис.13б. Корреляция вариаций наклонения геомагнитного поля в Европе за последние 10-12 тысяч лет по результатам палеомагнитных исследований озерных отложений. Наряду с результатами полученными автором, приведены данные по Финляндии [Ojala and Saarinen, 2002], Швеции [Snowball and Sandgren, 2002], Германии [Stockhausen, 1998], Великобритании [Turner and Thompson, 1982].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных научных исследований и разработок нам удалось решить основные технические и методические проблемы, характерные для различных этапов палеомагнитного изучения отложений современных озер. Созданная система технологического обеспечения открывает возможность широкого использования отложений современных озер в качестве высокоинформативных объектов палеомагнитных исследований. В соответствии с разработанным системным подходом, обеспечение палеомагнитных исследований озерных осадков необходимой априорной информацией достигается применением разработанного специализированного аппаратурно-методического сейсмоакустического комплекса. Предложенные способы обработки и сейсмостратиграфической интерпретации сейсмоакустических материалов обеспечивают оптимальное, с точки зрения информативности, производительности и стоимости работ, решение задач рекогносцировочного этапа палеомагнитных исследований озерных осадков, поставляя необходимую палеогеографическую информацию. Выполненные сейсмоакустические исследования более чем двух десятков озер позволили уточнить их генезис, обеспечили изучение гидрологических условий формирования осадков и накопления в них магнитных частиц, в ряде случаев выявили влияние неотектоники на седиментационный процесс. С точки зрения методологии, сейсмоакустические исследования озерных отложений представляют собой обязательный элемент рекогносцировочного этапа в палеомагнитном изучении осадков конкретного озера.

Технологические проблемы этапа отбора ориентированных, ненарушенных колонок широкого класса донных осадков современных озер решены путем создания уникального телескопического донного пробоотборника и поверхностного оборудования, обеспечивающих 100% извлечение керна длиной до 6,5 метров в условиях озер различного генезиса, батиметрии и размеров. Созданный пробоотборник позволяет отбирать, не нарушая текстуры осадков, как гелеобразные органогенные отложения, так и литифицированные терригенные осадки. Достигнутая точность ориентирования отбираемых колонок по склонению и наклонению составляет $1 \div 2^0$. Созданная установка по отбору осадков мобильна, высокотехнологична в эксплуатации и характеризуется низкими трудозатратами отбора колонок – порядка $6 \div 10$ человеко-часов на одну колонку. На этапе отбора и подготовки коллекций из поднятого со дна керна, нам удалось исключить деформации образцов и минимизировать наведенную лабораторную намагниченность отбираемой коллекции.

Обоснованная и использованная в работе технология диагностики магнитных частиц - носителей ЕОН - позволила получить однозначный ответ о составе и свойствах магнитной фракции отложений изученных современных озер, а примененные способы палеомагнитного анализа - уникальные по своей точности и достоверности данные о геомагнитном поле последних тысячелетий по озерным осадкам ранее неизученных территорий Восточной Европы и региона Аральского моря. Спектральный анализ вре-

менных рядов изменения наклона и склонения по осадкам впервые изученных озер в данных регионах методом максимальной энтропии и методом БПФ позволил выделить в колебаниях склонения и наклона несколько групп периодов. Подобные группы периодов PSV для последних нескольких тысяч лет были обнаружены ранее по мировым археомагнитным данным и палеомагнитным исследованиям отложений современных озер в Западной Европе, Северной Америке и других регионах. Выполненное сравнение полученных временных рядов с мировыми данными, выявило значительное сходство большинства морфологических особенностей изменения наклона и склонения с известными палеомагнитными и археомагнитными данными. Одновременно доказано, что существующее различие возраста осадков озер и возраста намагниченности, ярко проявившееся в оз. Нарочь, усложняет корреляцию вариаций геомагнитного поля по осадкам различных озер и ставит под сомнение ранее полученные количественные оценки дрейфа недипольных источников PSV по озерным данным. Многофакторный характер сдвига возраста намагниченности относительно возраста осадка в различных частях изучаемых колонок приводит к ошибкам временной шкалы, сопоставимым с величинами предполагаемого дрейфа недипольных компонент геомагнитного поля.

Разработанная система технологического обеспечения палеомагнитных исследований донных отложений современных озер позволяет широко и эффективно использовать в палеомагнетизме уникальный информационный канал - осадки современных водоемов. Впервые полученные палеомагнитные результаты по озерам Восточной Европы, Аральскому морю дополняют данные к познанию процессов генерации геомагнитного поля и эволюции границы ядро-мантия в четвертичном периоде, служат установлению взаимосвязи изменений климата и геомагнитного поля, а также изучению глобальных изменений, происходивших в голоцене в гидросфере, литосфере и атмосфере.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

Монографии

1. Магнитно-минералогические и палеомагнитные исследования краснокветов. Ред. Боронин В.П.- Казань: Изд-во КГУ, 1989, 134 с.
2. Уникальные экосистемы солонатоводных карстовых озер Среднего Поволжья. Ред. Алимов А.Ф., Мингазова Н.М.- Казань: Изд-во КГУ, 2001. 256 с.

Статьи, материалы конференций

3. Борисов А.С. Определение относительной палеонапряженности геомагнитного поля / Борисов А.С., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. // Геолого-геофизические исследования и разработки. - Казань: Изд-во КГУ, 1988, с.126-131.

4. Борисов А.С. Природа намагниченности некоторых типов осадочных пород / Борисов А.С., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. // Геолого-геофизические исследования и разработки. - Казань: Изд-во КГУ, 1988, с.131-135.
5. Борисов А.С. О природе компонент намагниченности маггемит-магнетит содержащих красноцветных осадочных пород / Борисов А.С., Ибрагимов Ш.З., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. // Физические принципы, аппаратура и методика петромагнитных исследований горных пород. - Магадан: СВКНИИ, 1988, с.31-33.
6. Борисов А.С. Об оценке палеомагнитных направлений статистическими методами / Борисов А.С., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. // Вопросы геолого-геофизических исследований Татарстана и сопредельных областей. - Казань: Изд-во КГУ, 1991, с.98-104.
7. Борисов А.С. Анализ некоторых методик определения вариаций напряженности древнего геомагнитного поля по осадочным породам / Борисов А.С., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. // Вопросы геолого-геофизических исследований Татарстана и сопредельных областей - Казань: Изд-во КГУ, 1991, с.105-112.
8. Borisov A.S. Geomagnetic secular variations through the last 3500 years as recorded by lake Aslikul sediments from eastern Europe (Russia) / Nurgaliev D.K, Borisov A.S., Heller F., Burov B.V., Jasonov P.G., Khasanov D.I., Ibragimov Sh.Z. // Geophys. Res. Lett., 1996, V.23, N 4, P.375-378.
9. Борисов А.С. Технологические аспекты палеомагнитных исследований отложений современных озер / Борисов А.С., Буров Б.В., Ясонов П.Г., Нургалиев Д.К., Ибрагимов Ш.З., Хасанов Д.И. // Мониторинг геологической среды: активные эндогенные и экзогенные процессы. Материалы Первой Всероссийской Конференции. - Казань: Изд-во КГУ, 2000, с. 136-139.
10. Борисов А.С. Вариации элементов геомагнитного поля за последние 4 тыс. лет по палеомагнитным исследованиям донных отложений озера Асликуль (Юго-Западная Башкирия) / Нургалиев Д.К., Хеллер Ф., Буров Б.В., Борисов А.С., Ясонов П.Г., Хасанов Д.И., Ибрагимов Ш.З. // Геомагнетизм и аэрономия, 2000, Том 40, № 4, с. 97-106.
11. Borissov A. Palaeomagnetism of recent russian lake sediments / Nurgaliev D., Heller F., Borissov A., Yassonov P., Khasanov D., Bourov B. // Geologica Carpathica, 2000, v. 51, no. 3, p. 179-180.
12. Borissov A. Holocene PSV palaeomagnetic records from Lakes Naroch and Svir, Belorussia: preliminary results / Nurgaliev D., Heller F., Borissov A., Yassonov P., Khasanov D. Bourov B. // Terra Nostra, 2000, V.10, P. 84-87.
13. Борисов А.С. Сейсмоакустические исследования при изучении палеомагнетизма донных отложений современных озер / Борисов А.С., Нигметзянова А.Р. // Разведка и охрана недр. 2002. № 1, с. 48-49.
14. Борисов А.С. Палеомагнетизм отложений современных озер Восточной Европы / Борисов А.С., Буров Б.В., Ясонов П.Г., Нургалиев Д.К., Ибрагимов Ш.З., Хасанов Д.И., Хеллер Ф. // Материалы Всероссийской научной конференции "Геология, Геохимия и Геофизика на рубеже XX и XXI веков". - М., 2002, том 3, Геофизика, с.87-88.

15. Борисов А.С. Сейсмоакустические работы в комплексе палеомагнитных и палеоэкологических исследований донных отложений современных озер / Борисов А.С., Нигметзянова А.Р. // Материалы семинара "Палеомагнетизм и магнетизм горных пород", Борок, 19-22 октября 2002 г. - М., изд. ГЕОС. С.14-15.
16. Борисов А.С. Предварительные результаты исследования палеовековых вариаций геомагнитного поля в голоцене по донным отложениям Аральского моря / Борисов А.С., Нургалиев Д.К., Heller F., Ибрагимов Ш.З., Ясонов П.Г., Чернова И.Ю. Хасанов Д.И., Буров Б.В. // Материалы семинара "Палеомагнетизм и магнетизм горных пород", Борок, 19-22 октября 2002 г. - М.: Изд. ГЕОС. С. 16-17.
17. Борисов А.С. Сейсмостратиграфический анализ донных отложений современных озер: палеоклиматическое значение / Нигметзянова А.Р., Борисов А.С. // Георесурсы, 2002, №3 (11), с.2-3.
18. Борисов А.С. Вариации элементов геомагнитного поля, записанные в донных отложениях оз. Свирь (Белоруссия) / Борисов А.С., Нургалиев Д.К., Хеллер Ф., Ясонов П.Г., Буров Б.В., Хасанов Д.И., Ибрагимов Ш.З., Чернова И.Ю. // Процессы постседиментационного намагничивания и характерные изменения магнитного поля и климата Земли в прошлом. - Магадан: ДВО РАН, СВКНИИ, 2003, С. 73-81.
19. Борисов А.С. Палеомагнетизм озерных отложений - проблема временной привязки PSV / Борисов А.С., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. // Труды Объединенной международной научной конференции "Новая геометрия природы", август 25- сентябрь 5, 2003. - Казань. Т. 1. С. 234 - 239.
20. Borisov A.S. PSV Record for the Last ~ 1200 Years from Aral Sea / D.K. Nougaliyev, F. Heller, A.S. Borisov, I. Hajdas, G. Bonani, P.G. Iassonov, H. Oberhansli // Georesources. 2003. N 7. P. 26-31.
21. Borisov A.S. Very high resolution paleosecular variation record for the last ~ 1200 years from the Aral Sea / D.K. Nougaliyev, F. Heller, A.S. Borisov, I. Hajdas, G. Bonani, P.G. Iassonov, H. Oberhansli // Geoph. Research Letters. 2003. V.30, N 17, 1914; doi: 10.1029/2003GL018145.
22. Борисов А.С. Вариации геомагнитного поля в Центральной Европе за последние 12 тысяч лет по данным исследования донных отложений озера Нарочь (Белоруссия) / Нургалиев Д.К., Борисов А.С., Ф. Хеллер, Ясонов П.Г., Буров Б.В., Хасанов Д.И., Ибрагимов. Ш.З., Чернова И.Ю. // Физика Земли, 2003, № 3, с. 76-86.

Тезисы докладов

23. Борисов А.С. Автоматизация процесса измерения и обработки данных в палеомагнетизме / Борисов А.С., Жарков И.Я., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. // Палеомагнетизм при решении вопросов тектоники и стратиграфии (тезисы докладов) – Иркутск: ОНТИ, 1985, с. 58.
24. Борисов А.С. Определение относительной палеонапряженности по отношению приращений современной и древней компонент ЕОН / Борисов А.С., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. // III Всесоюзный съезд по геомагнетизму. Тезисы докладов. - Киев: ИГ АН УССР, 1986, с.140-141.

25. Борисов А.С. Оценка возможностей определения палеонапряженности по осадочным породам комплексом методов / Борисов А.С., Ушакова И.Ю. // IV Всесоюзный съезд по геомагнетизму. Тезисы докладов.– Владимир–Суздаль, 1991, с.140-141.
26. Борисов А.С. Уточнение величины нормировочного параметра при определении палеонапряженности методом Q / Борисов А.С., Шуликов О.Е. // Материалы III Всесоюзного съезда по геомагнетизму. - Киев: ИГ АН УССР, 1986, с.142.
27. Borisov A.S. A corer for lake deposits / Borisov A.S., Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G // *Annales Geophysicae*, 1994, Suppl. 1, v. 12, part 1, p. 163.
28. Borisov A.S. Variations of geomagnetic field of Holocene recorded in the sediments of the modern lakes of Ural region, Russia / Nurgaliev D.K., Borisov A.S., Jasonov P.G., Burov B.V., Ibragimov Sh.Z., Khasanov D.I., Mukhutdinova N.G. // *Annales Geophysic.*, 1994, Suppl.1, v.12, Part 1, C171.
29. Borisov A. Variations of Geomagnetic Field for the last 5000 years in the East Europe (from recent sediments of lakes) / Nurgaliev D., Borisov A., Burov B., Jasonov P., Khasanov D., Ibragimov Sh. // *Annales Geophysic.*, 1995, Suppl.I, v.13, Part I, C68.
30. Borisov A. Geomagnetic secular variations in the North-western part of Russia / Nurgaliev D., Borisov A., Burov B., Jasonov P., Khasanov D., Ibragimov Sh. Heller F., Hajdas I. // *Annales Geophysic.*, S.1, v.14, 1996, C. 125.
31. Borisov A. Correlation of magnetic susceptibility in recent lake sediments of the pre-Ural region (Russia) / Nurgaliev D., Borisov A., Jasonov P., Khasanov D., Shalandina V., Heller F., Hajdas I. // *Annales Geophysicae*, Supp.1, v.14, 1996, C 130.
32. Borisov A. Some common relations between magnetic susceptibility and paleoclimatic parameters in sediment cores of east-european lakes (RUSSIA) / Nurgaliev D., Heller F., Borisov A. Burov B., Jasonov P., Khasanov D. // *Annales Geophysicae*, Supp.1, v.15, 1997, C 104.
33. Борисов А.С. Донные отложения современных озер как источник информации о динамике геологических процессов / Борисов А.С, Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г., Хасанов Д.И., Якупов А.Ш. // Мониторинг геологической среды: активные эндогенные и экзогенные процессы. Тезисы Всероссийской конференции. - Казань, 1997г. С.62.
34. Борисов А.С. Вариации элементов геомагнитного поля в Восточной Европе за последние 10 тысяч лет / Нургалиев Д.К., Борисов А.С., Хеллер Ф., Ясонов П.Г., Косарев В.Е. // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент. Тезисы докладов. Борок, 18-22 октября 1999г. - М.: ОИФЗ РАН, 1999, с. 43-44.
35. Борисов А.С. Использование отложений современных озер в решении проблемы дрейфа геомагнитного поля / Борисов А.С., Нургалиев Д.К. // Конференция "Геология и современность". Тезисы докладов. - Казань, 1999, Изд-во «Мастер Лайн», с.31-32.