

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ФРОЛОВА НАТАЛИЯ СЕРГЕЕВНА  
**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВОСПРИЯТИЯ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НЕКОТОРЫМИ ВИДАМИ  
ГИДРОБИОНТОВ**

Специальность 25.00.28 – океанология

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -  
д.физ.-мат.н., проф. Степанюк И.А.

Санкт-Петербург

2018

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<b>Введение</b> .....	4
<b>1 Обзор имеющихся физических данных о восприятии и предчувствиях опасных гидрометеорологических процессов</b> .....	16
1.1 Гидрометеорологические процессы как источники электромагнитных полей КНЧ-диапазона.....	16
1.1.1 Электромагнитные поля волн и течений.....	16
1.1.2 Электромагнитные поля приводного слоя атмосферы над морем...	17
1.1.3 Электромагнитные поля облачности.....	19
1.1.4 Электромагнитные поля циклонов и фронтальных разделов.....	21
1.2 Восприятие некоторыми гидробионтами опасных гидрометеорологических процессов .....	24
1.2.1 Обзор биоэлектрических особенностей гидробионтов.....	28
1.2.2 Сомовые рыбы как индикаторы опасных геофизических процессов.....	32
<b>2 Оценки вероятных механизмов восприятия и предчувствия гидробионтами гидрометеорологических процессов над водоёмами..</b>	36
2.1 Электромагнитные поля гидрометеорологических процессов как источники информации для гидробионтов.....	36
2.2 Расчёты проникновения электромагнитных полей КНЧ-диапазона в водную среду.....	37
2.3 Вероятные механизмы предчувствия гидробионтами изменений гидрометеорологических условий в среде обитания.....	41
<b>3 Разработка новых технологий проведения физических экспериментов с гидробионтами</b> .....	43
3.1 Новые экспериментальные установки для проведения исследований.	43
3.1.1 Установка для определений двигательной активности сомовых рыб при воздействии переменного электрического поля.....	43
3.1.2 Установка для определений двигательной активности сомовых рыб при воздействии переменного магнитного поля.....	44
3.1.3 Автоматизированное определение двигательной активности карповых и сомовых рыб с помощью видеокамеры.....	45
3.1.4 Автоматический метод регистрации двигательной активности камчатских крабов.....	48
3.2 Методики проведения экспериментов.....	49
3.2.1 Критерии подобия при моделировании воздействия электромагнитных полей гидрометеорологических процессов на гидробионтов.....	50
3.3 Методики обработки полученных экспериментальных данных....	59
3.3.1 Спектральный и кросс-спектральный анализы.....	59
3.3.2 Оценки и анализ фрактальных размерностей изучаемых процессов.....	59

3.3.3 Методика выявления реакций гидробионтов при искусственном воздействии электрическими и магнитными полями.....	60
3.3.4 Вейвлет-анализ.....	63
<b>4 Результаты выполненных исследований.....</b>	<b>67</b>
4.1 Карповые рыбы.....	67
4.1.1 Суточная изменчивость двигательной активности карповых рыб	67
4.1.2 Оценки связи средних значений активности с геомагнитными возмущениями.....	70
4.1.3 Оценка связи короткопериодной ритмики активности с геомагнитными бурями.....	76
4.1.4 Оценки связи двигательной активности с приближением циклонов и фронтальных разделов.....	79
4.2 Сомовые рыбы.....	85
4.2.1 Реакция сомовых рыб на гидрометеорологические процессы.....	85
4.2.2 Поиск механизмов восприятия сомовыми рыбами гидрометеорологических процессов. Чувствительность к переменным электрическим полям.....	91
4.2.3 Чувствительность сомовых рыб к переменным магнитным полям	95
4.3. Камчатские крабы.....	99
4.3.1 Влияние магнитных бурь на двигательную активность камчатских крабов. Эффекты предчувствия.....	99
4.3.2 Влияние проходящих циклонов на двигательную активность камчатских крабов.....	108
4.4 Время задержек реакций («латентные периоды») при воздействии на гидробионтов переменными электрическими или магнитными полями.....	112
4.5 Поиск механизмов предчувствия посредством влияния на физико-химические процессы. Эксперименты со штормгласом.....	119
4.5.1 Экспериментальная установка.....	122
4.5.2 Результаты наблюдений.....	125
<b>Заключение.....</b>	<b>130</b>
<b>Список использованных сокращений.....</b>	<b>133</b>
<b>Список используемой литературы.....</b>	<b>134</b>
<b>Приложение А.....</b>	<b>142</b>
<b>Приложение Б.....</b>	<b>143</b>

## Введение

На сегодняшний день развитие рыбного промысла и аквакультурных хозяйств ставит перед специалистами задачу поиска различных способов повышения эффективности. В этой связи постоянно совершенствуются методы вылова рыбы, а также улучшается качество прогноза с учетом гидрофизических, гидрохимических и других абиотических факторов, оказывающих влияние на промысловые скопления.

Среди абиотических факторов очень важное значение имеют электромагнитные поля (ЭМП) крайне низкочастотного (КНЧ) диапазона, возбуждаемые при различных гидрометеорологических процессах. Формирование таких полей доказано в ряде исследований (например [1,2,3,4]). Однако их воздействие на двигательную активность (ДА) гидробионтов в настоящее время мало изучено.

В лабораторных условиях выявлено, что естественные электромагнитные поля (ЕЭМП) воспринимаются различными видами гидробионтов и являются для них, по-видимому, единственно возможным источником важнейшей информации об изменениях гидрометеорологических условий в среде обитания. Во время проведения экспериментов моделировалась изменчивость ЭМП, соответствующая естественным вариациям. В результате были установлены специфические реакции ряда гидробионтов на эти ЭМП: резкое изменение ДА, изменения естественной ритмики, уход из зоны действия поля.

Изучалось также влияние на пищевую и ДА рыб геомагнитных возмущений ("магнитных бурь"). Это влияние подробно рассмотрено на примере форели в работе [5]. Его целесообразно учитывать в технологиях аквакультуры и рыбопромысловых технологиях, что, несомненно, будет способствовать повышению эффективности. В процессе исследований было установлено, что чувствительность к ЭМП может проявляться либо через восприятие электрической составляющей поля, либо через восприятие магнитной составляющей. В КНЧ-диапазоне ЭМП эти составляющие очень сильно различаются.

Восприятие электрической составляющей наблюдается только у животных, имеющих органы электрорецепции (акуловые, сомовые и др.) [6,7,8–11].

У остальных исследованных гидробионтов было выявлено непосредственное восприятие вариаций магнитного поля (например, у карповых рыб).

В данной работе в ходе проведенных экспериментов в качестве объектов изучения были выбраны самые доступные виды пресноводных рыб: сомовые (*Corydoras aeneus*) и карповые (*Cyprinus carpio L.*). Для экспериментов с морскими гидробионтами использовались камчатские крабы (*Paralithodes camtschaticus*). Основное внимание было уделено карпам, как наиболее популярным видам гидробионтов в аквакультуре. В качестве показателя геомагнитных возмущений (ГМВ) использовались значения магнитной индукции, а для оценки метеорологической обстановки – приземные карты погоды.

Для того чтобы более подробно разобраться с поведением гидробионтов и обосновать сделанные заключения с точки зрения физики, были разработаны и собраны специальные установки, которые впоследствии были запатентованы.

#### *Цель работы:*

Изучить эффекты восприятия и предчувствия опасных гидрометеорологических процессов некоторыми видами пресноводных и морских гидробионтов и выявить возможные физические механизмы этих эффектов.

#### *Задачи работы:*

1. Проанализировать возможности проникновения в водную среду электромагнитных полей КНЧ-диапазона, возбуждаемых при гидрометеорологических процессах над водоемами.
2. Разработать технологии экспериментальных длительных (сутки и более) исследований ДА групп рыб в лабораторных условиях, создать новые установки для автоматизированных измерений.

3. Изучить изменение ДА карпов при геомагнитных возмущениях. Получить экспериментальные зависимости поведения рыб от вариаций индукции геомагнитного поля.
4. Изучить изменчивость ДА некоторых видов пресноводных рыб (карповые, сомовые) при приближении и прохождении биологически важных гидрометеорологических процессов.
5. Изучить реакции пресноводных гидробионтов (сомовые) на предъявление искусственных переменных электрических и переменных магнитных полей (ПеЭП и ПеМП) различных частот.
6. Изучить изменения ДА морских гидробионтов (камчатские крабы) при изменчивости геофизических и гидрометеорологических процессов.
7. Проверить гипотезы о восприятии и предчувствии гидробионтами гидрометеорологических процессов (штормов) посредством влияния ЭМП этих процессов на физико-химические структуры (на примере штормгласса).

*Область исследования:*

Исследование выполнено в области, соответствующей шифру специальности 25.00.28 – океанология: раздел 6 – биологические процессы в океане, их связь с абиотическими факторами среды и раздел 13 – методы оценки экологически значимых гидрофизических и гидрохимических характеристик вод океана, оптимальных условий существования морских экосистем, защиты ресурсов океана от истощения и загрязнения, а также раздел 9 специальности 25.00.27 – разработка теории и методологии гидроэкологии, изучения водных экосистем, теории взаимодействия абиотических и биотических компонентов этих систем, методов оценки экологически значимых гидрологических и гидрохимических характеристик.

*Метод исследования:*

Был использован физико-экспериментальный метод исследования, основанный на представлении биологических и физико-химических систем, как «черного ящика» с нормированным сигналом на входе и регистрируемой реакцией на выходе ([12]).

*Научная новизна:*

В работе были получены следующие основные результаты:

1. Показано, что глубина проникновения в водную среду электромагнитных полей КНЧ-диапазона (толщина скин-слоя) для ряда морских водоемов составляет сотни метров, а для пресноводных – до 1 км и более.
2. Разработаны новые технологии экспериментальных длительных (сутки и более) исследований двигательной активности групп рыб в лабораторных условиях при различных гидрометеорологических ситуациях. Предложены и использованы критерии подобия при моделировании воздействия ЭМП гидрометеорологических процессов на ДА гидробионтов.
3. Для проведения экспериментов были разработаны и использованы две специальные измерительные установки. Новизна технических решений подтверждена патентами РФ.
4. Выявлена суточная биоритмика ДА рыб по результатам 34-часового эксперимента в спокойных геофизических и гидрометеорологических условиях; эти данные были использованы при выявлении реакций рыб на гидрометеорологические процессы.
5. Установлена зависимость средней ДА рыб от интенсивности ГМВ. Максимальное значение коэффициента корреляции составляет -0.8 для карпов и +0.87 для сомов золотистых; различные знаки свидетельствуют о противоположной реакции этих рыб на магнитные возмущения.

6. С использованием методов теории фракталов установлено, что поведение рыб носит преимущественно детерминированный характер; спады в «хаос» связаны с прохождением фронтов во время проведения экспериментов.
7. Экспериментально выявлены: интенсивность и время реакции рыб на предъявление искусственных переменных электрических и переменных магнитных полей в крайне низкочастотных (КНЧ) диапазонах; выявленные экстремумы частотных зависимостей интерпретированы как физиологические (частота дыхания и частота сердечных сокращений) и геофизические (область 7-8 Гц).
8. Экспериментально установлены реакции камчатских крабов на магнитные бури. Выявлен эффект предчувствия начала магнитных бурь.
9. Экспериментально установлены реакции камчатских крабов на приближение и прохождение циклонов. Реакции характеризуются возбуждением ДА крабов, что, видимо, связано со стремлением уйти из опасной зоны воздействия.
10. В экспериментах с физико-химической структурой (штормглассом) подтверждена гипотеза о реакции таких структур на ЭМП проходящих гидрометеорологических процессов (циклонов), что, в свою очередь, приводит к подтверждению идеи магниточувствительности гидробионтов через подобные структуры.

*Практическая значимость:*

1. Разработанные технологии исследований внедрены в настоящее время в учебный процесс РГГМУ.
2. Результаты проведенных исследований будут использованы:
  - при проектировании систем экологического мониторинга морских и пресноводных бассейнов;
  - при создании и эксплуатации систем аквакультуры;
  - при разработке технологий управления поведением гидробионтов.

*На защиту выносятся:*

1. Защищенные патентами РФ новые установки для проведения лабораторных экспериментов.
2. Установленные физические закономерности восприятия и предчувствия опасных гидрометеорологических процессов рядом пресноводных гидробионтов (карповые и сомовые рыбы).
3. Установленные физические закономерности эффектов восприятия и предчувствия опасных гидрометеорологических процессов морскими гидробионтами (камчатские крабы).
4. Установленные эффекты реакций биологического аналога – физико-химической системы морского штормгласса на приближение и прохождение циклонов в сравнении с изменчивостью ЭМП этих циклонов.

*Достоверность результатов* обусловлена тщательно отработанной технологией экспериментов и большим объемом самостоятельно полученных данных, обработанных с применением современных статистических методов.

*Апробация работы:*

Результаты работы докладывались на ежегодной конференции при поддержке Королевского Метеорологического Общества (Англия, Эксетер, 2011), IX Международной крымской конференции «Космос и биосфера» (Украина, Алушта, 2011), на международной конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований» (Одесса, 2011), на международной конференции «Влияние космической погоды на человека» (ИКИРАН, Москва, 2012), V Всероссийской конференции «Поведение рыб» (Борок, Россия, 2014), а также на Итоговых сессиях РГГМУ.

*Публикации результатов работы:*

**Публикации в изданиях из списка ВАК:**

1. Степанюк И.А., Фролова Н.С. Возможности использования рыб в прогностических целях для предсказания опасных процессов в природе

- [Текст]. // Общество. Среда. Развитие.: Научно-теорет. журнал/ Гл. ред. В.Г. Егоркин – Спб.: ЦНИТ Астерион, 2011. – №3. – С.218-222.
2. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.** Способность рыб предчувствовать опасные гидрометеорологические явления [Текст]. //Морской вестник. – 2012. – № 1(41).–С.61-63.
  3. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.**, Зимин А.В. Связь между характеристиками штормгласса и электромагнитными возмущениями [Текст]. // Морской вестник. – 2013. – №2(46). – С.91-92.
  4. Муравейко А.В., Степанюк И.А., Муравейко В.М., **Фролова Н.С.** Эффекты влияния электромагнитных полей в области «шумановских резонансов» на активность гидробионтов [Текст]. //Вестник МГТУ. – 2013. – Т.16, №4. – С.764-770.

**Другие публикации:**

5. **Фролова Н.С.** Индикация опасных геофизических процессов с помощью гидробионтов [Текст]. // Современные направления теоретических и прикладных исследований 2011.: Сборник научных трудов по материалам международной конференции. – Одесса: Черноморье, 2011 – смжджТ.31. – С.56-61.
6. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.** Поиск физических механизмов прогностических реакций рыб на космогеофизические процессы [Текст]. // Космос и биосфера: Тезисы докладов IX Международной крымской конференции, 10-15 октября, 2011, Алушта, Украина. – Симферополь: ДИАЙПИ,2011. – С.98.
7. Емелина А.В., Владимирова О.М., **Фролова Н.С.** Влияние вариаций магнитного поля Земли на двигательную активность краба Баренцева моря [Текст]. // Материалы XXX юбилейной конференции молодых учёных Мурманского института, посвящённой 150-летию со дня рождения Н.М. Книповича «Проблемы океанографии, биологии и освоения морей российской Арктики», май 2012. – Мурманск, 2012. – С.61-63.

8. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.**, Зимин А.В., Перевозчиков Н.Ф. Поиск механизмов влияния гидрометеорологических процессов на штормгласс [Электронный ресурс]. // Влияние космической погоды на человека: труды международной конференции, 4-8 июня, 2012, Москва: ИКИ РАН, 2013. – Т.2. – С.739-745. – Режим доступа: [www.iki.rssi.ru/books/2013breus2.pdf](http://www.iki.rssi.ru/books/2013breus2.pdf).
9. **Фролова Н.С.** Изменение активности гидробионтов в условиях действия электромагнитных полей гидрометеорологического и геофизического происхождения [Текст] // Поведение рыб: труды V всероссийской конференции, 8-9 ноября, 2014, Борок, Россия: Костромской печатный дом, 2014. – С.273-281.
10. Степанюк И.А., Зимин А.В., **Фролова Н.С.** Воздействие ЭМ-полей на физико-химическую структуру штормгласса [Текст]. // Проблема мониторинга электромагнитных полей КНЧ-диапазона в тропосфере и гидросфере Земли – СПб.: РГГМУ, 2014. – С.132-136.
11. Устройство для регистрации изменчивости характеристик физико-химической системы штормгласса.: **патент** № 141806 Российская Федерация: МПК G01W 1/00/ **Фролова Н.С.**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет». – №2014100791/28; заявл. 10.01.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. №16.
12. Устройство для регистрации двигательной активности гидробионтов.: **патент** № 148670 Российская Федерация: МПК G01D 3/036/ **Фролова Н.С.**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет». – №2014100788/28; заявл. 10.01.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
13. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.** Электромагнитные поля гидрометеорологических процессов как фактор экологии гидробионтов//Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU». – 2016. – № 35. – С.84-95.
14. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.**, Муравейко В.М., Емелина А.В., Владимирова О.М. Реакция краба PARALITHODES CAMTCHATICUS (Tilesius, 1815) на

- приближение и прохождение циклонов//Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU». – 2016. – № 35. – С.96-100.
15. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.**, Муравейко В.М., Емелина А.В., Строганова О.А. Восприятие баренцевоморскими мидиями переменных магнитных полей//Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU». – 2016. – № 35. – С.126-132.
16. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.**, Муравейко В.М., Емелина А.В., Строганова О.А., Левачева Н.А. Особенности поведения баренцевоморских мидий в условиях лабораторного эксперимента//Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU». – 2016. – № 37. – С.11-18.
17. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.**, Муравейко В.М., Емелина А.В., Трифонова О.С. Геомагнитная активность и уловы баренцевоморских гидробионтов (на примерах семги и трески) //Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU». – 2016. – № 37. – С.162-172.
18. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.**, Зимин А.В., Хотченков С.В., Нестерова (Трунина) Т.В. Возможности управления поведением гидробионтов путем использования электромагнитных полей КНЧ-диапазона//Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU». – 2016. – № 37. – С.188-196.
19. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.** Физические механизмы восприятия гидробионтами биологически важных гидрометеорологических процессов над водоёмами//Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU». – 2017. – № 43. – С.232-244.

*Структура и объем диссертации:*

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации 146 страниц, включая 90 рисунков, 5 таблиц и 2 приложения. Список литературы содержит 81 наименование.

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, а также изложены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дается обзор имеющихся данных о восприятии и предчувствиях опасных гидрометеорологических процессов некоторыми видами гидробионтов. Отдельно рассмотрен вопрос о возможных механизмах предчувствия, который в последнее время сильно волнует ученых-биофизиков и на который до сих пор нет четкого ответа.

**В разделе 1.1** рассмотрены гидрометеорологические процессы, которые приводят к возбуждению ЭМП КНЧ-диапазона, способных быть для гидробионтов источниками информации об этих процессах. Из этих процессов выделены: ЭМП крайне низких частот, возбуждаемые при штормовом волнении, при развитии конвективной облачности, например в зонах фронтальных разделов. Также рассматриваются переменные электромагнитные поля в водоемах, обусловленные возмущениями геомагнитного поля.

**В разделе 1.2** представлена общая информация о чувствительности живых организмов, в частности карповых и сомовых рыб, к ЭМП. Указан максимум чувствительности данных рыб в области 7-8 Гц. Рассмотрена классификация гидробионтов в зависимости от электрочувствительности. Отдельное внимание в данном разделе уделено электромагнитному фону в воде и влиянию электрических полей различной интенсивности на рыб.

**Во второй главе** рассматриваются вероятные механизмы восприятия и предчувствия гидробионтами гидрометеорологических процессов над водоёмами.

**В разделе 2.1** обосновывается выбор электромагнитных полей приводного слоя атмосферы над морем и электромагнитных полей циклонов и фронтальных систем как наиболее вероятных источников информации для гидробионтов в физических механизмах восприятия.

**В разделе 2.2** приводятся расчёты проникновения ЭМП КНЧ-диапазона в водную среду. В наших задачах преимущественно представляют интерес ЭМП гидрометеорологических процессов на частотах 0,1-2 Гц и на частотах 6-8 Гц.

**В разделе 2.3** обсуждается проблема поиска вероятных механизмов предчувствия у живых существ.

**В третьей главе** приводится описание измерительных установок для проведения экспериментов с рыбами и крабами, объясняется методика проведения экспериментов и обработки полученных данных. На одну из измерительных установок получен патент.

**В разделе 3.1** дается описание экспериментальных установок, применяемых для определения двигательной активности сомовых и карповых рыб, а также крабов.

**В разделе 3.2** рассмотрена методика проведения экспериментов, определены критерии подобию при моделировании воздействия ЭМП гидрометеорологических процессов на гидробионтов.

**Раздел 3.3** посвящен методике обработки и анализа полученных экспериментальных данных.

**В четвертой главе** приводятся результаты выполненных исследований.

**В разделе 4.1** описываются результаты экспериментов с карповыми рыбами.

**В разделе 4.2** описываются результаты экспериментов с сомовыми рыбами. Отдельное внимание уделено реакции сомовых рыб на гидрометеорологические процессы.

**В разделе 4.3** описываются результаты экспериментов с камчатскими крабами.

**В разделе 4.4** отдельно рассмотрено время задержек реакций («латентные периоды») при воздействии на гидробионтов переменными электрическими или магнитными полями.

**В разделе 4.5** описывается поиск механизмов предчувствия гидробионтами опасных гидрометеорологических процессов через неравновесные физико-химические системы. В качестве модели такой системы был использован известный у мореплавателей штормглас.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

## **1 Обзор имеющихся физических данных о восприятии и предчувствиях опасных гидрометеорологических процессов**

### **1.1 Гидрометеорологические процессы как источники электромагнитных полей КНЧ-диапазона**

В данном разделе диссертации рассмотрены основные гидрометеорологические процессы, которые приводят к возбуждению ЭМП КНЧ-диапазона, обеспечивающих локальную «подкачку» энергии в глобальное ЭМП Земли и способных быть для гидробионтов источниками информации об этих процессах. Информативные свойства этих полей отмечались в ряде известных работ (например [1,2, 13-16] и др.)

#### **1.1.1 Электромагнитные поля волн и течений**

ЭМ-фон в водоёмах носит сложный характер. Так при движении морской воды в магнитном поле Земли (МПЗ) в результате явления индукции возникает электрическое поле, которое в свою очередь создаёт вторичное магнитное поле, называемое так в отличие от главного магнитного поля [3]. Величина этих полей определяется как напряжённостью МПЗ, так и скоростью потока воды и ее электропроводностью. Такие поля называются магнитогидродинамическими полями (МГДП). К основным источникам МГДП относятся: ветровое волнение, зыбь, приливы и течения.

Напряжённость МГДП, создаваемых волнением, зависит от характеристик волн, а именно, от их высоты, периодов, длин, а для мелких водоёмов – ещё и от проводимости грунта дна. При увеличении высоты и периодов волн возрастают и поля, индуцированные волнением, однако с глубиной они быстро затухают. На глубине равной половине длины волны, амплитуда магнитного поля уменьшается в 23 раза по сравнению со значениями на поверхности [3,17].

Период колебаний МГДП, связанных с течениями, совпадает с периодами колебаний скорости движения воды. Океанские течения генерируют поля с

напряжённостью до 100 мкВ/м, которые зависят также и от глубины распространения течения [3]. Следует отметить, что регистрируемые электрические и магнитные поля имеют чёткую амплитудную и частотную связь с динамическими характеристиками потока и отражают его структуру [18]. В работе [19] отмечено, что электрочувствительные гидробионты могут использовать индуцированные электрические поля для поиска путей перемещения во время миграции, а также для ориентации во время суточных перемещений. Кроме того, электрические поля, возникающие при волнении, могут служить источником информации о состоянии водной поверхности.

Однако следует учитывать, что возникающие МГДП быстро затухают с расстоянием, поэтому они не могут объяснить высокую заблаговременность предчувствия гидробионтами биологически опасных гидрометеорологических явлений.

### 1.1.2 Электромагнитные поля приводного слоя атмосферы над морем

ЭМП приводного слоя атмосферы над морем формируются за счет двух основных причин:

- из-за заряжения поверхности моря распределенными зарядами, формирующимися МГДП [20];
- из-за того, что в приводном слое атмосферы сосредоточены аэроионы, то есть электрически заряженные аэрозоли, перемещающиеся под воздействием волн [1,3].

Первый механизм, рассмотренный в работе [20], вероятно, менее значим для гидробионтов, чем электрические поля волн в воде и порождаемые ими поля магнитной индукции. Воздействие таких полей на гидробионтов установлено открытием [21] и последующими работами этих авторов.

Второй механизм может рассматриваться как аэрофизический. Здесь рассматриваются ЭМП, порождаемые над морем. Они могут регистрироваться как в

атмосфере, так и в толще воды. Из таких полей, по-видимому, наибольший интерес для данной работы представляют поля, обусловленные движениями аэроионов [1].

Фактически аэроионы представляют собой частицы, в которых много как положительных, так и отрицательных ионов. Соответственно, в приводном слое атмосферы над морем формируется некоторая структура из аэроионов. В условиях волнения происходит постоянный выброс аэроионов в воздух, с последующим их оседанием на поверхности, что позволяет рассматривать приводный слой, насыщенный аэроионами, как «замороженный». Модель приводного слоя представлена на рисунке 1.1.

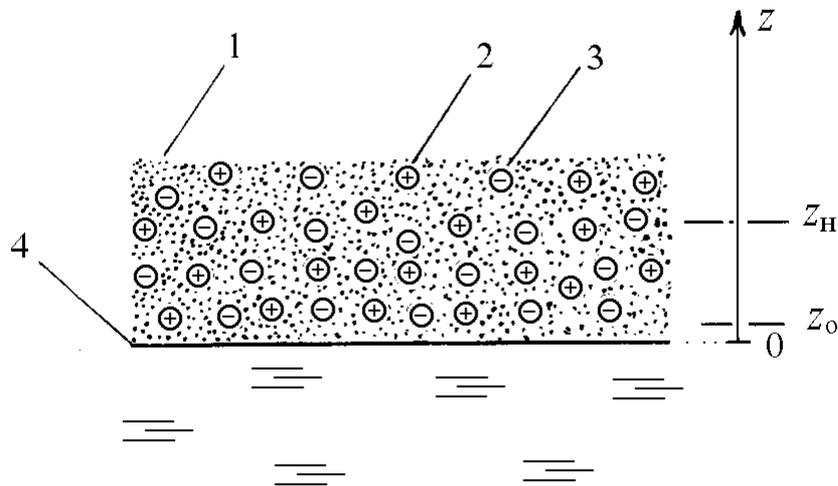


Рисунок 1.1 – Модель приводного слоя с «вмороженными» аэроионами. 1 – нейтральная воздушная среда, 2 – положительные аэроионы, 3 – отрицательные аэроионы, 4 – поверхность моря. Из работы [1].

Наличие турбулентных процессов в такой среде во время шторма возбуждает амплитудно-модулированные ЭМП, которые регистрируются как по электрическим, так и по магнитным составляющим, при этом несущими частотами являются частоты 4-12 Гц с энергетической модой 6-8 Гц, которая совпадает с первой модой «шумановских» резонансов. По аналогии с инфразвуковым «голосом моря», открытым В.В. Шулейкиным, ЭМП приводного слоя во время шторма можно назвать электромагнитным «голосом моря». В то же время ЭМП на указанных

частотах способны распространяться на большие расстояния и проникать в воду на глубину более 100 м, что обуславливает возможность получения прогностической информации гидробионтами о приближающемся шторме.

### 1.1.3 Электромагнитные поля облачности

Важнейшим источником ЭМП КНЧ-диапазона являются конвективные процессы в тропосфере. У конвективных структур присутствуют сильная турбулентность, которая более всего выражена в кучевых мощных облаках (*Ci cong*) и в кучево-дождевых облаках (*Cb*). В облаках конвективных форм в ходе их развития происходит постепенное накопление зарядов. В результате наличия турбулентных процессов в облаке формируется переменное электромагнитное поле. Если присутствуют очень быстрые турбулентные пульсации, то возникает амплитудно-модулированное ЭМП, где несущей частотой является частота «быстрых» пульсаций, а частотой модуляции – исходное ЭМП. Энергия индуцированного поля в основном сконцентрирована в области между облаком и его отображением. Другими словами, ЭМП облачности при проводящей подстилающей поверхности может регистрироваться только непосредственно под облаком.

Следовательно, рассмотренный процесс напоминает собой то, что происходит в приводном слое атмосферы над морем. Следовательно, и здесь можно говорить об электромагнитном «голосе облака».

Пример регистрации такого ЭМП представлен на рисунке 1.2, по которому видно, что высокочастотные пульсации, отображаемые в надводном канале, фильтруются слоем воды, и на глубине 10 м запись становится сглаженной.

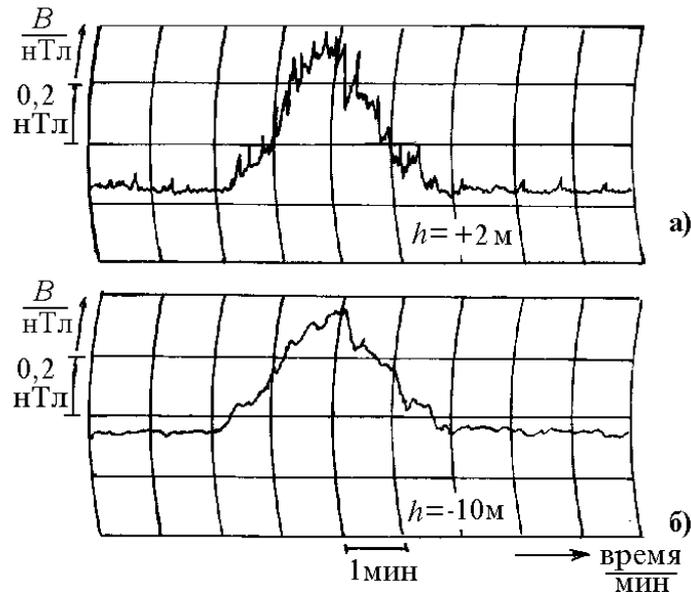


Рисунок 1.2 – Амплитудно-модулированное ЭМП при прохождении небольшого кучевого облака над пунктом наблюдений. Из работы [1].

Значительно ситуация меняется при наличии осадков, которые содержат летящие вниз заряженные частицы. Осадки преимущественно заряжаются отрицательно, и, оседая, переносят отрицательный заряд вниз, а лёгкие атмосферные ионы, облачные капли и кристаллы заряжаются положительно и вместе со своим зарядом переносятся восходящими потоками вверх.

В результате осадков регистрируется большое число импульсных сигналов, а средний сигнал от облака снижается. Пример записи прохождения кучево-дождевого облака в сопровождении снегопада из монографии [1] приведен на рисунке 1.3.

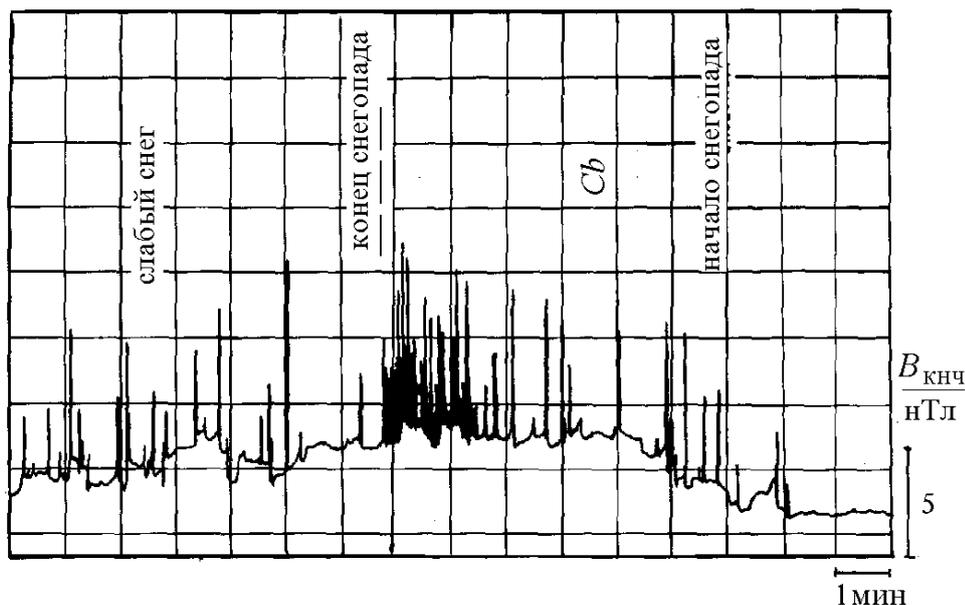


Рисунок 1.3 – Регистрация ЭМП кучево-дождевого облака при снегопаде.  
Из работы [1].

#### 1.1.4 Электромагнитные поля циклонов и фронтальных разделов

Классически циклоны обычно содержат в своей структуре фронты. К типичным фронтам относятся теплый фронт, холодный фронт и фронты окклюзии, т.е. частично сомкнувшиеся теплый и холодный фронты, а также вторичные фронты, которые возникают в неустойчивых холодных воздушных массах за счёт неоднородного прогрева её подстилающей поверхности в тыловой части циклона. В тыловой части циклона преобладает переменная облачность, кучевые, кучево-дождевые облака с кратковременными осадками и порывистый ветер [22].

Однако фронтальные разделы сопровождают не только циклоны, они ещё проходят и по барическим ложбинам. И в том, и в другом случае фронтальные разделы обязательно содержат облачные структуры, обязательно при этом возбуждаются ЭМП КНЧ-диапазона. Конечно же, здесь есть свои особенности по сравнению с типичными полями облаков, рассмотренными ранее. Так возбуждаемые в зонах фронтов колебания являются не только ЭМП, но и обычными колебаниями, которые называются внутренними гравитационными волнами (ВГВ).

Поскольку ВГВ волны распространяются преимущественно вдоль границ раздела в любых стратифицированных средах, то в циклоне они концентрируются в центре образования. В центре циклона ВГВ превращаются в инфразвук, который представляет собой продольные колебания. Именно эти инфразвуковые продольные колебания идут вверх по «трубке» оси циклона, амплитуда их увеличивается из-за падения плотности с высотой. В результате нижняя граница ионосферы подвергается колебаниям, другими словами возникают снова поперечные колебания с периодами ВГВ (5-20 мин). Таким образом, формируются амплитудно-модулированные ЭМ-колебания.

Характеристики распределения мощности таких ЭМ-сигналов в зависимости от расстояния до центра циклона показаны на рисунке 1.4, заимствованном из работы [1]. Здесь выявлен несимметричный характер распределения – в направлении движения циклона (вперед от центра) мощность существенно выше, чем на таких же расстояниях в тыловой части. То есть формируется направленный характер формируемого поля.

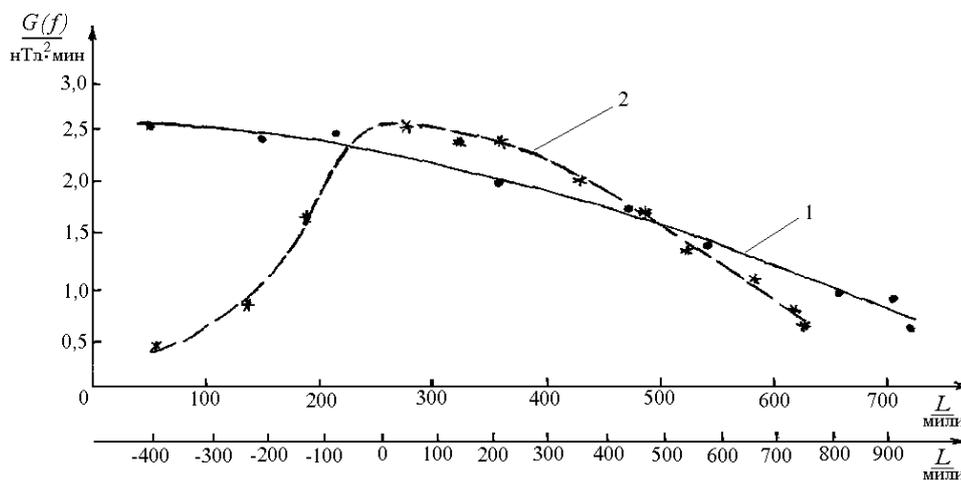


Рисунок 1.4 – Изменчивость мощности модулирующих вариаций с периодами ВГВ при прохождении циклона

1 – изменчивость при приближении; 2 – полная изменчивость (от 900 миль до – 400 миль). Из работы [1].

В работе [2] изучались ЭМП циклонов в области частот 6-8 Гц без учета амплитудной модуляции колебаниями ВГВ. В отличие от модулированных полей из работы [1] здесь наблюдается ненаправленный характер возбуждаемого поля (рисунок 1.5).

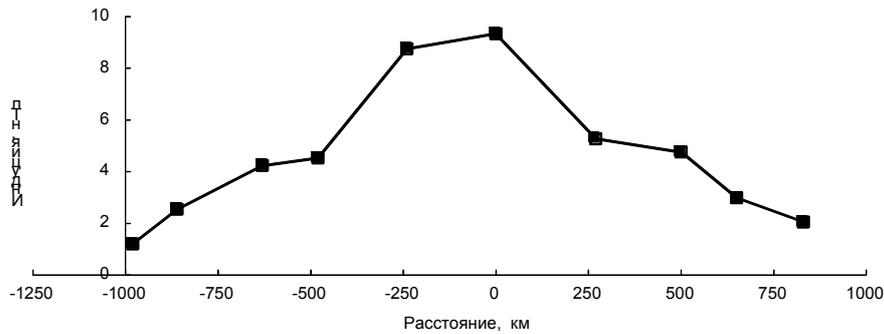


Рисунок 1.5 – Изменения средней величины индукции ЭМП на частотах 6-8 Гц от расстояния до центра циклона. Из работы [2].

Оценки изменчивости ЭМП на частотах 6-8 Гц, выполненные для разных вариантов движения циклона в работе [2], приведены на рисунке 1.6. Здесь характеристики нормированы на расстояние до центра циклона 100 км.

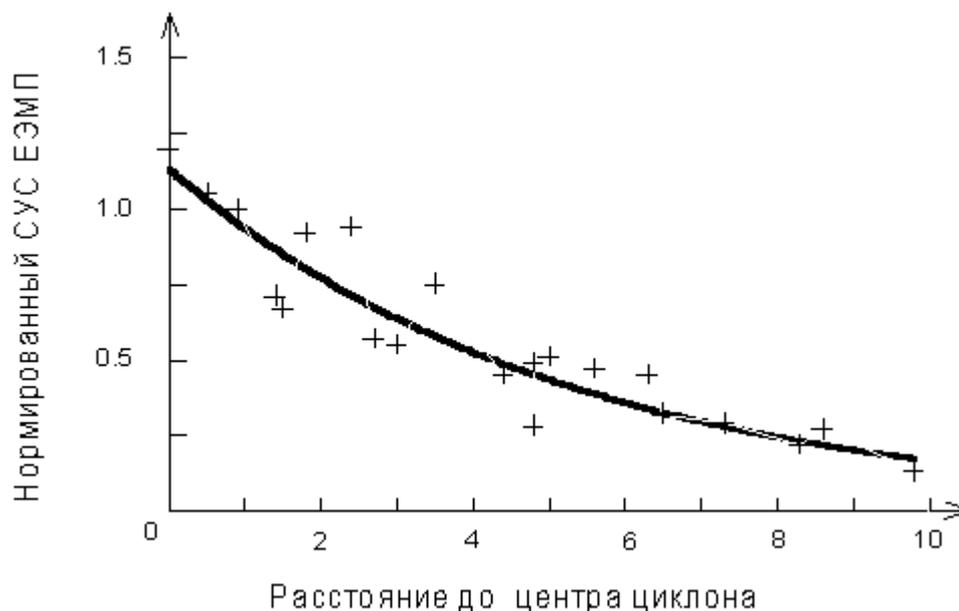


Рисунок 1.6 – Нормированные характеристики изменчивости среднего уровня сигнала ЕЭМП (СУС ЕЭМП) на частотах 6-8 Гц по регрессионной модели из работы [2].

Рассмотренные особенности ЕЭМП, связанных с циклонами, имеют большое значение для гидробионтов и подробно описаны в разделе диссертации 4.2.1. Для выявления определенных механизмов восприятия гидробионтами ЕЭМП, возбуждаемых при гидрометеорологических процессах, необходимы экспериментальные исследования. Однако следует сказать, что при проведении лабораторных экспериментов по моделированию искусственных ЭМП, необходимо учитывать и исключать из результатов влияние ЕЭМП КНЧ-диапазона, которые формируются при различных гидрометеорологических процессах.

## 1.2 Восприятие некоторыми гидробионтами опасных гидрометеорологических процессов

В настоящее время ученые во всем мире заняты проблемами исследования даже, на первый взгляд, самых незначительных фактов необычного поведения животных перед такими опасными явлениями, как землетрясения, цунами, ураганы,

морские штормы и т.д. Точно известно лишь то, что животные обладают некоторым очень эффективным механизмом предчувствия опасных процессов, но механизмы такого предчувствия пока до конца неясны.

Известно, что некоторые живые организмы обладают большей чувствительностью к ЭМП по сравнению с человеком [23]. О высокой чувствительности многих животных к ЭМП свидетельствуют данные об использовании геомагнитного поля Земли в качестве ориентира. Такая способность обнаружена у многих живых организмов: простейших, насекомых, ракообразных, рептилий, рыб, птиц и др. (например, [24,25,26,27]). Более того, многие животные используют ЭМП для осуществления дистанционного общения, которое обеспечивает согласованное выполнение перемещения стай рыб и птиц, что также наблюдается в стадах млекопитающих и скоплениях насекомых [28, 29].

В литературных источниках (например [19]) рассматриваются предчувствия многими гидробионтами гидрометеорологических процессов. В частности такое предчувствие выявлено у медуз, при этом описан механизм восприятия некоторых предвестников шторма, в частности инфразвуковых колебаний, порождаемых в приводном слое атмосферы при взаимодействии ветра с волнами (инфразвуковой «голос моря»). Этот эффект описан В.В.Шулейкиным в ранних изданиях «Физики моря».

Однако применительно к медузам возникает закономерное сомнение, что они воспринимают такой предвестник как инфразвук. Инфразвук действительно формируется в штормовых условиях в воздухе (например [30]), но в таком случае медузы должны его воспринимать своим зонтиком, да и то, если находятся на поверхности. Однако в зонтике отсутствуют какие-либо чувствительные к инфразвуку элементы. И на поверхности медузы находятся не всегда. Довольно частое расположение слоя медуз на глубине 1-1.5 м. В имеющейся же литературе предполагается, что восприятие обеспечивается специфическими образованиями на щупальцах. Все это маловероятно из-за особенностей проникновения звука в воду.

Существует гипотеза о реакции медуз на изменения атмосферного давления, которые формируются перед подходом шторма. Эти изменения действительно

существуют, но они невелики. Реально 10-20 гПа. Это эквивалентно толщине слоя воды в 10-20 см. При типичном наличии волнения на поверхности моря маловероятно ожидать какие-либо реакции у медуз.

Таким образом, возникает задача поиска иных действующих факторов, связанных с морскими штормами.

На сегодняшний день проблема поиска механизма предчувствия среди некоторых видов гидробионтов является очень популярной. Вообще можно сказать, что различные исследования в этой сфере очень важны, так как пока человек не обладает достаточно точным механизмом предсказания опасных явлений. Особенно это касается цунами, представляющих наибольший интерес для ученых-океанологов. Цунами являются следствием подводных землетрясений, а сейсмические предвестники обладают малой заблаговременностью.

Многие ученые высказывают различные гипотезы о возможных механизмах предчувствия землетрясений и цунами, однако сколько-нибудь убедительные экспериментальные подтверждения этих гипотез отсутствуют. На сегодняшний день наибольший интерес представляют предположения, связанные с восприятием животными естественных электрических и магнитных полей.

Например, в ряде экспериментов было показано, что баренцевоморские скаты *Raja radiata* способны воспринимать своими электрорецепторами такие слабые электрические поля в воде, которые генерируются геофизическими источниками на частотах менее 2 Гц – магнитными бурями и морскими волнами [11,31,32]. Конечно, может возникнуть предположение о том, что подобное восприятие магнитных бурь является следствием высокой электрочувствительности данного вида гидробионтов. Однако, восприятие магнитных бурь, сопровождающееся изменениями поведенческой активности, также обнаружено и у карповых рыб, которые могут быть отнесены к разряду неэлектрочувствительных гидробионтов. При фактически отсутствующей электрочувствительности карпы реагируют на переменные магнитные поля напряженностью примерно в единицы нТл при длительном воздействии и десятки нТл почти сразу после начала воздействия [33].

Известно, что некоторые виды сомовых (японский карликовый сомик, туркестанский сомик) предчувствуют такие явления, как шторм, цунами, землетрясения, о приближении которых можно узнать, наблюдая за поведением данного вида гидробионтов. Установлен максимум чувствительности сомиков в области 7-8 Гц (Рисунок 1.7) [34]. Эти частоты – основная мода "шумановских резонансов" волновода Земля-ионосфера. В этой связи очень интересны результаты по частотным характеристикам "чистой" магниточувствительности карповых рыб (Рисунок 1.8), а именно наличие двух основных пиков чувствительности – в области физиологических частот и в области частот 6-8 Гц, которая может быть обозначена как геофизическая область [35, 36].

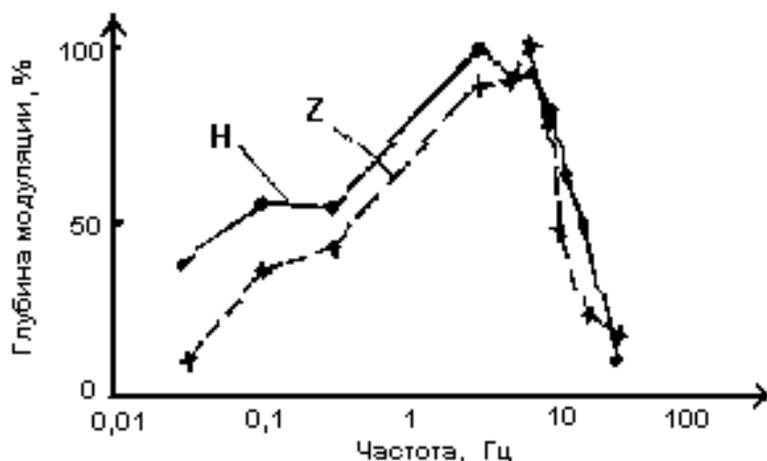


Рисунок 1.7 – Характеристики чувствительности сомиков к горизонтальному (H) и вертикальному (Z) электрическим полям.

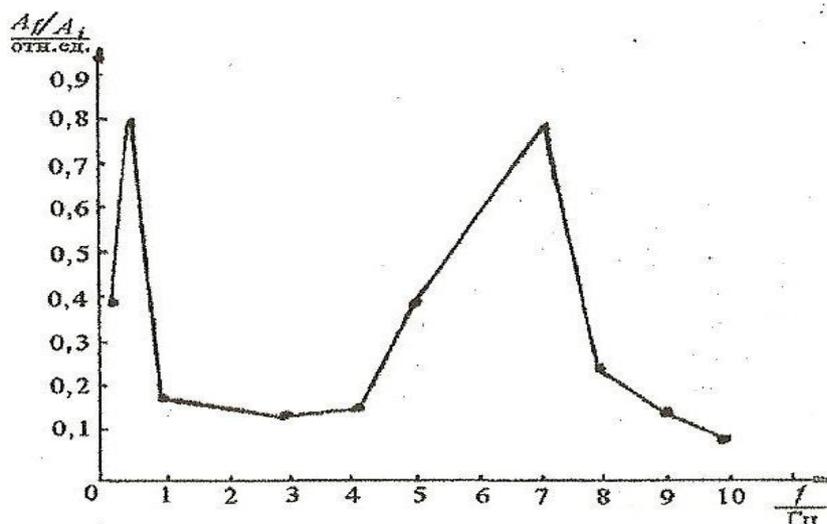


Рисунок 1.8 – Чувствительность карповых рыб к ПемП различных частот.

### 1.2.1 Обзор биоэлектрических особенностей гидробионтов

Класс рыб включает более 20 тыс. видов [6]. Соответственно, что и способы передачи информации у различных рыб во время их общения, при питании, обороне и размножении очень разнообразны. К настоящему времени ученые обнаружили шесть каналов общения рыб: оптический, акустический, гидромеханический, химический, световой и электрический. Помимо перечисленного, все рыбы могут передавать сигналы контактно, то есть прикосновениями. Особую роль в жизни рыбы играет электрический канал. Практически все рыбы способны излучать и воспринимать электрические поля. В зависимости от электрочувствительности всех рыб можно условно разделить на три группы: сильноэлектрочувствительные виды, имеющие электрические рецепторные органы; слабоэлектрические виды, обладающие специализированными электрогенераторными тканями; неэлектрические рыбы, т.е. все остальные.

В настоящее время установлено, что естественные электрические поля в морях и океанах могут достигать величин, сопоставимых с чувствительностью рыб. Соответственно, чтобы иметь возможность соотнести поведение гидробионтов с характером естественного электромагнитного фона в воде, необходимо располагать не только данными измерений фона, но и обладать представлениями об источниках фона, о факторах, определяющих его характер и особенности в данном районе и в

данное время, а также о физических явлениях, коррелирующих с изменениями уровня фона.

Электромагнитный фон в воде носит довольно сложный характер: он определяется физическими, химическими и биологическими явлениями. В естественном электромагнитном фоне выделяются следующие составляющие: постоянное МПЗ и его вариации, геомагнитные пульсации. Индукция стационарного магнитного поля Земли составляет в среднем 50 000 нТл. Для МПЗ характерны географические аномалии и временная изменчивость (вариации). Различают спокойные и возмущенные вариации. К спокойным вариациям относят: солнечно-суточные, лунно-суточные и годовые вариации. Помимо рассмотренных периодических вариаций стационарное МПЗ характеризуется также непериодической изменчивостью, под которой в первую очередь понимают магнитные бури.

На данном фоне вариаций МПЗ формируются геомагнитные пульсации. Пульсациями называют изменчивость МПЗ с частотами менее 3 Гц. Вариации на более высоких частотах относят к переменному электромагнитному полю. Геомагнитные пульсации возбуждаются за счет взаимодействия излучения Солнца с магнитосферой Земли (рисунок 1.9). Продолжительность пульсаций в течение суток меняется от нескольких минут до нескольких часов, а амплитуда может составлять от 0,1 нТл до 10 нТл.

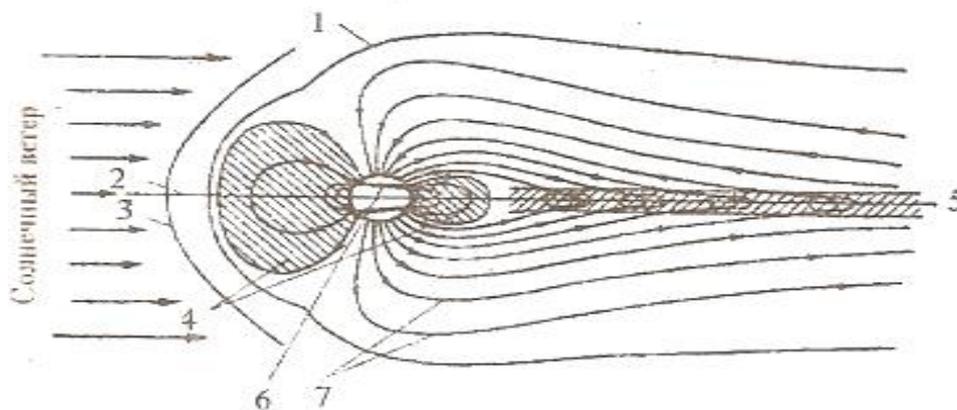


Рисунок 1.9 – Схема взаимодействия солнечного излучения с магнитосферой Земли (например, из [1]).

1-магнитопауза, 2-геомагнитный экватор, 3-ударная волна, 4-области захваченной радиации, 5-нейтральный слой, 6-зона полярных сияний, 7-магнито-силовые линии.

Изменчивость МПЗ и геомагнитных пульсаций (геомагнитная активность) оценивается с помощью обобщенных индексов. Наиболее популярными являются суммарный планетарный индекс  $K_p$  и локальный индекс  $K$  [37].

К магнитным бурям относятся возмущения с амплитудой, превышающей 50 нТл. Интенсивность бури обычно оценивается по интенсивности и характеру сформировавшихся пятен на Солнце. Однако биологическое значение имеет не только интенсивность магнитной бури, но и ее спектральный состав [38,39].

Кроме возмущений МПЗ следует отдельно выделить магнитные возмущения, связанные с переменной знака межпланетного магнитного поля (ММП) [40]. Хотя величина этих возмущений невелика, сама смена знака ММП, видимо, является индикатором других действующих факторов на биологические объекты, источником возмущений которых является Солнце.

В результате возмущений МПЗ в гидросфере формируются достаточно значимые электрические поля и токи, называемые теллурическими. [3,4]. Другими словами, в гидросфере необходимо рассматривать не только ПемП, но и ПемЭП.

Рыбы воспринимают электрическое поле постоянного тока в виде ориентировочной двигательной реакции. При увеличении напряженности поля наступает оборонительная реакция: рыба сильно возбуждается, что выражается во

вздрагивании тела, плавников, головы, и пытается покинуть зону действия поля. Если напряженность увеличить еще больше, то происходит анодная реакция – рыба движется к аноду. При дальнейшем повышении напряженности поля наблюдается электронаркоз, когда рыба теряет равновесие и перестает реагировать на внешние раздражители. Последующее увеличение напряженности приводит к гибели рыбы. Такая схематическая реакция рыб в поле постоянного тока описана в ряде работ, например, [41, 42].

Немного иначе рыбы реагируют на электрические поля переменного тока: первые две стадии практически такие же, а при дальнейшем росте напряженности наступает стадия осциллотаксиса – рыба располагается поперек линий тока. Еще большее увеличение напряженности вызывает электронаркоз. Переменный ток сильнее возбуждает рыбу по сравнению с постоянным. После действия переменного тока рыба долго не может прийти в нормальное состояние. Подобные реакции отмечены в работах [42, 43, 44].

Еще более разнообразно и сложно поведение рыб в полях импульсного электрического тока. Реакции рыб зависят от частоты, амплитуды, формы и продолжительности импульсов. В связи с этим изучение реакции рыб на импульсный ток значительно сложнее. Различные виды рыб реагируют на импульсные поля по-разному, но в общем случае стадии реакций у них повторяют стадии при действии полей постоянного тока, главное его отличие от постоянного тока – это более выраженные возбуждение и торможение [43, 45].

Подводя итог выше написанному, следует отметить, что реакции рыб на слабые и сильные электрические поля отличаются. Так слабые электрические поля рыба может использовать в целях ориентации и общения, а в сильных электрических полях реакции рыб являются безусловно-рефлекторными.

Такие наблюдавшиеся различия привели к появлению мнения о существовании амплитудных «окон» чувствительности (например, [46]). Это вызывает интерес и желание проверить высказанные идеи экспериментально (см. далее в данной работе п. 4.2.2).

### 1.2.2 Сомовые рыбы как индикаторы опасных геофизических процессов

В настоящее время известно, что отдельные виды сомовых, в частности карликовый и туркестанский сомики, меняют свое поведение в ожидании таких явлений как шторм, цунами, землетрясение, а именно приходят в необычайно возбужденное состояние [19]. Также известно, что перед землетрясениями и цунами, а также в результате прохождения циклонов с фронтальными образованиями, возникают резкие изменения характеристик ЕЭМП, в том числе и в области КНЧ, характерных для геомагнитных и геофизических возмущений [1].

В ходе проведенных экспериментов с сомовыми рыбами максимум электрочувствительности сомиков наблюдался в области 7-8 Гц. Как уже упоминалось в работе, именно с частотами 7-8 Гц связано понятие "шумановских резонансов" в области между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы. А именно в этой области распространяются возмущения электромагнитного поля, обусловленные электрофизическими явлениями при опасных гидрометеорологических и геофизических процессах. Другими словами, в ситуации предчувствия приближения опасных гидрометеорологических событий вероятный механизм представляется в большей степени связанным с электромагнитными полями, возбуждаемыми в системе циклона или отдельного фронта [1]. Механизмы возбуждения этих полей преимущественно обусловлены турбулентными процессами в облаках и трансформацией акустического инфразвукового излучения циклона в ЭМП в нижних слоях ионосферы, а при распространении над морем – дополнительно электрофизическими процессами в приводном слое атмосферы при взаимодействии ветра с взволнованной поверхностью моря [3].

В работе [2] проводилось углубленное изучение связей между характеристиками возмущений ЕЭМП и приближением циклонов, а также одиночных фронтальных разделов. В ходе работы были отобраны 6 случаев прохождения циклонов и 2 случая прохождения отдельных фронтальных разделов в районе г. Санкт - Петербурга. Временные реализации, выбранные для рассмотрения, составляли от 1 до 3 суток. Синоптические ситуации за стандартные

метеорологические сроки для отобранных периодов сопоставлялись с данными о ЕЭМП. Пример такого сопоставления представлен на рисунках 1.10 и 1.11.

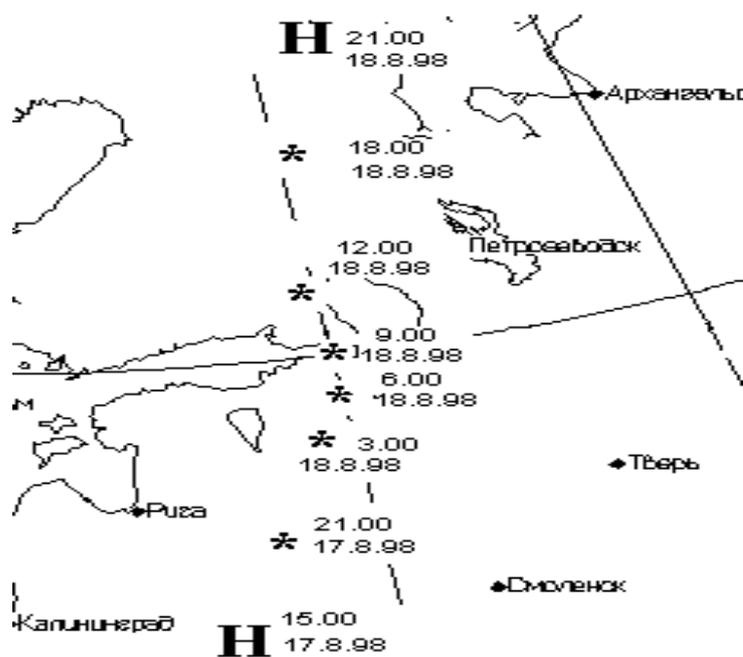


Рисунок 1.10 – Схема движения одиночного циклона с юга из района г. Киева к С-Петербургу и далее через Финляндию на север (звёздочками обозначено местоположение центра циклона в стандартные синоптические сроки). Из работы [2].

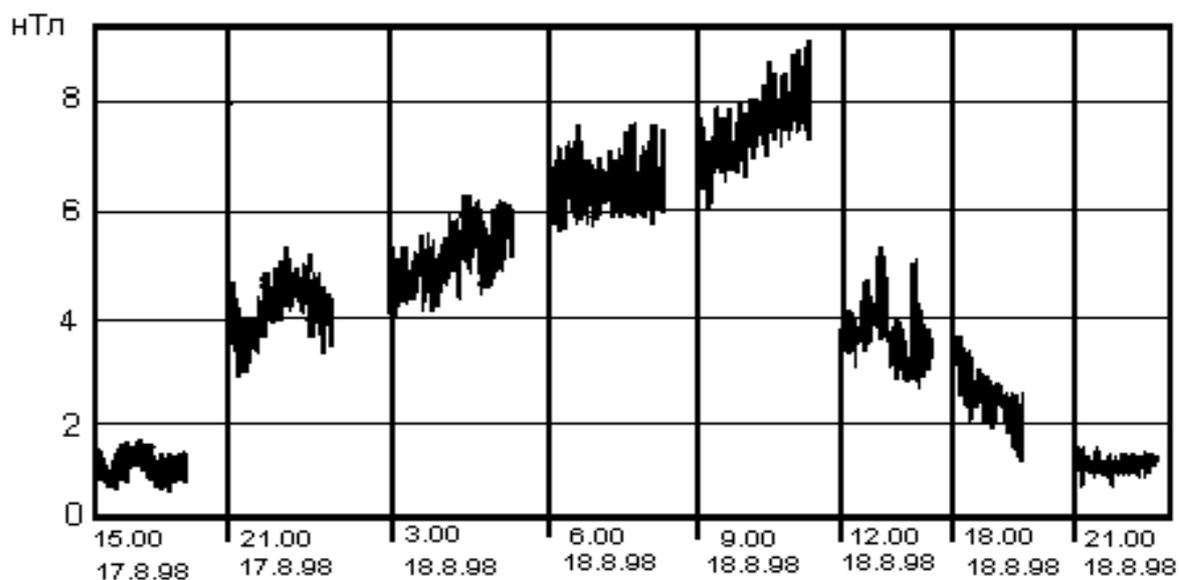


Рисунок 1.11 – Вариации ЕЭМП при прохождении одиночного циклона в районе С.-Петербурга. Из работы [2].

На рисунке 1.11 приводятся 20 минутные записи ЕЭМП, их середина соответствует по времени синоптическим срокам, за которые приводятся данные о местоположении центра циклона. При исходной барической ситуации в точке наблюдений типа малоградиентного поля (центр циклона южнее г. Смоленска) регистрируется сравнительно "спокойный" фоновый уровень ЕЭМП (срок 16.00 ч 17.08.98 г., рисунок 1.11) При приближении циклона к СПб, начиная с расстояния до его центра порядка 600 км, наблюдалось возрастание уровня сигнала, на который накладываются периодические вариации. Максимальный уровень ЕЭМП наблюдался при прохождении циклона в районе города и ослаблялся при удалении циклона.

Повышение уровня ЕЭМП с приближением циклона прослеживалось, независимо от генерального направления движения барического образования. Из рассмотренных в работе [2] 6 случаев 2 соответствовали движению циклона с запада на восток, 3 - с юго-запада на северо-восток, 1- с юга на север. Кроме того, данная связь наблюдалась независимо от сезона: 3 из рассмотренных ситуаций наблюдались в летний период, 2 - в осенний и 1- в зимний. Также не прослеживалась связь между давлением в центре циклона и регистрируемым уровнем ЕЭМП.

Однако, в работе [2] отмечается, что подъем среднего уровня регистрируемых полей при одинаковых расстояниях от центра циклона до точки наблюдения был на 0,5-1 нТл меньше в случае приближения циклонов с юга по сравнению с приближавшимися с запада и юго-запада. Т. е. циклоны, проходящие над морем, вызывают шторм, в результате чего, как показано в работе [3], генерируются дополнительные свободные заряды. В силу гидродинамических причин происходит возбуждение переменного магнитного поля преимущественно на частотах 4 - 12 Гц. Очевидно, этот дополнительный источник ЕЭМП и привел к отмеченному выше результату при сравнении «морских» и «сухопутных» циклонов.

Также в работе [2] анализ массива данных показал, что прохождение единичных фронтальных разделов через точку наблюдения вызывает усиление

среднего уровня сигнала, аналогичное усилению при приближении и прохождении циклонов, но меньшее по величине, коэффициенты связи между средним уровнем сигнала и расстоянием до фронта достигают (- 0.68), между дисперсией сигнала и расстоянием до фронта – (- 0.64).

Следует отметить, что на экологическую значимость изменения характеристик ЕЭМП при опасных гидрометеорологических явлениях однозначно могут указывать только поведенческие эксперименты, связанные с изменением двигательной активности гидробионтов, поскольку при поведенческих экспериментах исследование объекта осуществляется по принципу «черного ящика», когда, точно не зная механизма восприятия поля, регистрируется только реакция на предъявление поля.

В ходе предварительных экспериментов, проведенных с сомовыми рыбами, в качестве биологических систем использовались небольшие стаи сомиков золотистых, как наиболее близких родственников дорогостоящих японских карликовых и туркестанских сомов [47]. В результате было доказано, что сомики повышают свою активность при возрастании электромагнитных возмущений крайне низких частот. Такая ситуация в ходе эксперимента возникла при лунном и солнечном затмениях, когда сомики становились необычайно возбужденными, почти выпрыгивая из аквариума. При этом реакция рыб оказалась опережающей. Лунное затмение сомики смогли почувствовать почти за 7 часов до его начала, а вот солнечное – всего лишь за 30-40 мин.

В результате проведенного эксперимента справедливо утверждать, что сомики способны предчувствовать опасные геофизические процессы, в частности землетрясение и, как его следствие, цунами, так как именно выстраивание Солнца, Луны и Земли в одну линию, которое как раз и наблюдается при затмениях, способно повысить сейсмическую активность и вызвать землетрясение.

## 2. Оценки вероятных механизмов восприятия и предчувствия гидробионтами гидрометеорологических процессов над водоемами

### 2.1 Электромагнитные поля гидрометеорологических процессов как источники информации для гидробионтов

Поставленные в работе задачи поиска физических механизмов восприятия и предчувствия гидробионтами гидрометеорологических процессов над водоемами с учетом выполненного обзора приводят к следующим выводам.

1. Гидробионты (морские и пресноводные), находясь внутри водной толщи, способны получать информацию о процессах над поверхностью водоема.

2. Источниками информации не может служить инфразвуковой «голос моря», поскольку он не проникает в водную толщу.

3. Источником информации не могут служить вариации гидростатического давления, возникающие при ветровом волнении. Эти вариации, как известно, могут наблюдаться лишь на глубинах, не превышающих половину длины волны. А большинство гидробионтов свободно перемещается по вертикали, т.е. изменения гидростатического давления для них «привычны».

4. Источником информации не могут служить вариации атмосферного давления – они чрезвычайно малы для условий водной толщи.

5. Источником информации не может служить освещенность, особенно в северных морях.

В соответствии с этим можно обоснованно полагать, что единственным надежным источником информации о процессах над морем служат ЭМП КНЧ-диапазона, возбуждаемые при таких процессах.

Из описанных в обзоре источников электромагнитных полей при гидрометеорологических процессах в физических механизмах восприятия наиболее вероятными представляются электромагнитные поля приводного слоя атмосферы

над морем (п. 1.1.2) и электромагнитные поля циклонов и фронтальных систем (п.1.1.4). Причинами такого предпочтения являются следующие:

1. Электромагнитные поля приводного слоя атмосферы над морем формируются преимущественно загребневыми вихрями при штормовом волнении [1]. Магнитная составляющая таких полей направлена по оси вихрей, т.е. горизонтально и вдоль гребней. В то же время их электрический вектор является вихревым и ортогональным магнитной составляющей. В результате возникают условия распространения поля как вверх, так и по нормали к гребням волн, поскольку вектор потока мощности ЭМП (вектор Умова-Пойнтинга) определяется векторным произведением электрического и магнитного векторов, т.е. расположен по нормали к плоскости расположения этих векторов.

2. Электромагнитные поля циклонов и фронтальных систем выявлены экспериментально и теоретически не исследовались. Однако экспериментальные данные [1,2] также свидетельствуют о распространении этих ЭМП преимущественно в направлении их движения, тем самым они также могут являться надежным источником информации для гидробионтов.

3. ГМВ, проникающие в водную толщу, также не безразличны для гидробионтов. Это установлено для ряда видов, например в работе [19]. На наш взгляд, необходимость восприятия ГМВ обусловлена присутствием в них частот, соответствующих частоте сердечных сокращений (ЧСС) и частоте дыхания (ЧД). Соответственно, такие возмущения, видимо, нарушают нормальную ритмику ЧСС и ЧД.

## 2.2. Расчеты проникновения электромагнитных полей КНЧ-диапазона в водную среду

В наших задачах преимущественно представляют интерес ЭМП гидрометеорологических процессов на частотах 0,1-2 Гц и на частотах 6-8 Гц. Источниками ЭМП первого диапазона считаются процессы в верхней атмосфере, а ЭМП 2-го диапазона – процессы в тропосфере.

ЭМП на частотах 6-8 Гц в соответствии с вкратце описанными механизмами имеют горизонтально располагающиеся векторы магнитного поля. На границе раздела сред воздух–вода горизонтальные составляющие переменного магнитного поля равны между собой [48]. Из-за практически одинаковых значений абсолютной магнитной проницаемости получается также равенство горизонтальных составляющих магнитной индукции.

Расчеты проникновения ЭМП в различные водоемы выполнены нами по известной формуле 2.1:

$$h = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu_a}}, \dots \dots \dots (2.1)$$

где  $h$  – эквивалентная глубина проникновения тока (ЭМП) в массивную проводящую среду;

$\omega = 2\pi f$  – круговая частота поля;

$\gamma$  – удельная электрическая проводимость;

$\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость.

На глубине  $h$  ЭМП затухает в  $e$  раз. Соответственно, такая глубина называется толщиной скин-слоя.

Расчеты глубины  $h$  выполнены для выделенных выше частот при различных значениях  $\gamma$  (таблица 2.1).

Получается, что на интересующих нас частотах толщина скин-слоя превышает сотни метров для большинства водоемов.

Здесь, кроме зависимости от частоты, получена зависимость от удельной электрической проводимости. С увеличением проводимости толщина скин-слоя нелинейно уменьшается.

Таблица 2.1 – Глубина проникновения (скин-слой) ЭМП КНЧ-диапазона  
в характерные водоемы

Водоём	Солёность ‰	Уд. эл. провод. См/м	Частота, Гц									
			0.1	0.5	1	1.5	2	4	6	7	8	10
Пресный	-	0.01-0.1	5030	2250	1590	1300	1124	795	649	600	562	503
Балтийское Море	11	1.4	1344	601	425	347	300	212	173	160	150	134
Азовское Море	12	1.5	1300	580	410	335	290	205	168	155	145	130
Каспийское море	13-15	1.8	1185	530	374	306	265	187	153	141	132	118
Чёрное море	18	2.2	1072	480	339	276	240	170	138	130	120	107
Белое море	25	2.8	950	425	300	245	212	150	122	113	106	95
Баренцево море (прибрежные воды)	25-27	3.0	918	410	290	238	205	145	118	108	102	92

Обобщенное распределение толщин представлено на рисунке 2.1.

На рисунке 2.2 показана изменчивость толщины скин-слоя для пресноводных водоемов. Расчеты выполнены для значения проводимости 0,1 См/м. Выделенные частоты ЭМП гидрометеорологических процессов здесь могут проникать преимущественно до дна. Например, для озера Байкал (средняя глубина – 730 метров, максимальная – 1640 м).

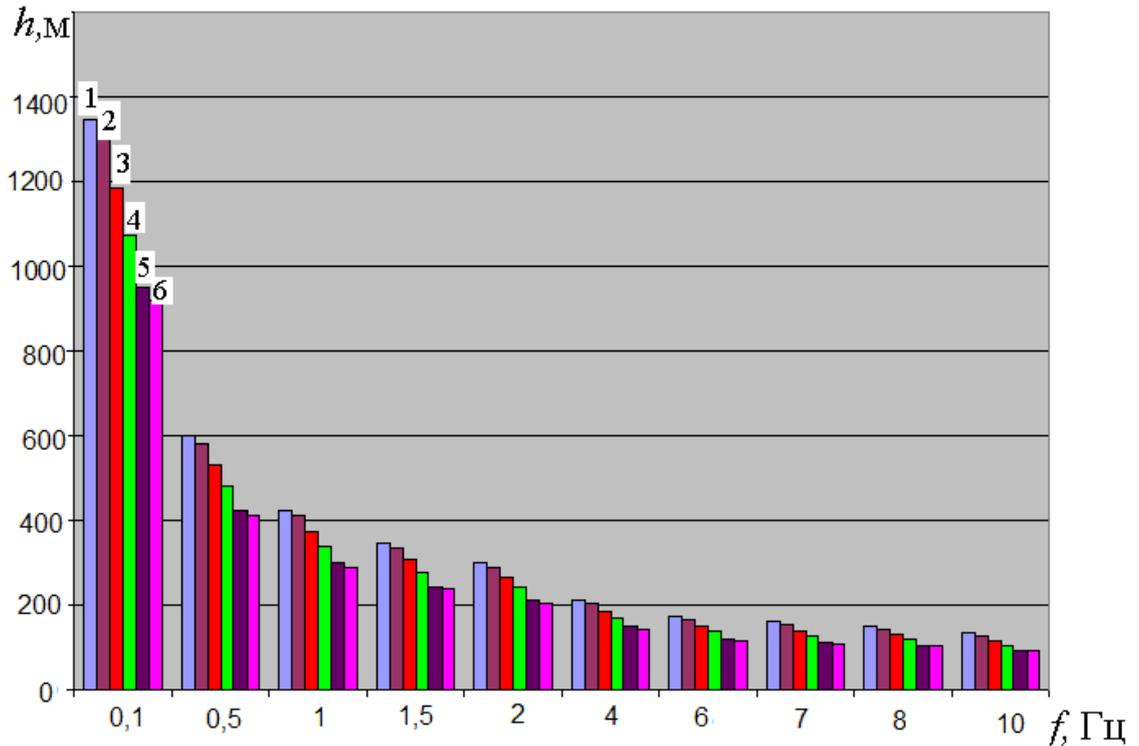


Рисунок 2.1 – Толщина скин-слоя для некоторых морей РФ при различных частотах ЭМП. Обозначения: 1 – Балтийское море; 2 – Азовское море; 3 – Каспийское море; 4 – Черное море; 5 – Белое море; 6 – Баренцево море (прибрежные воды).

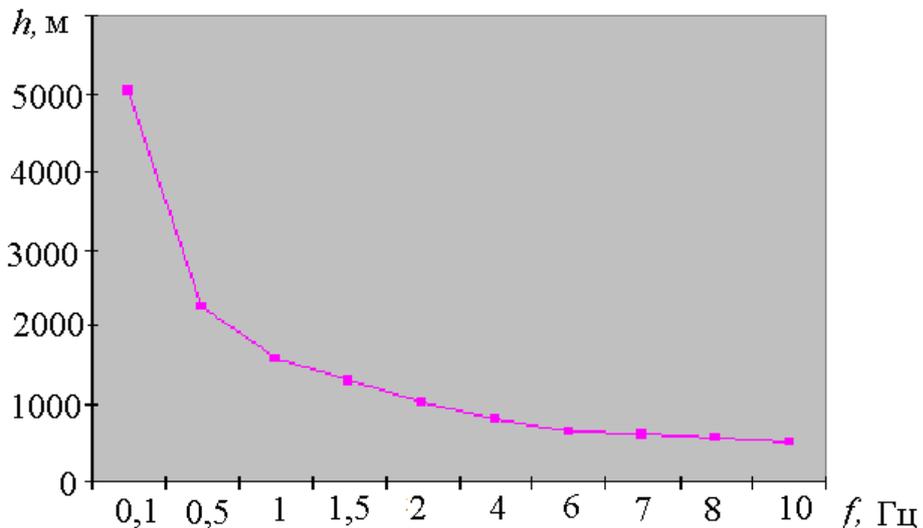


Рисунок 2.2 – Толщина скин-слоя в пресноводных водоемах при различных частотах ЭМП.

В соответствии с выполненными расчетами можно обоснованно полагать, что единственным надежным источником информации о процессах над морем служат

ЭМП КНЧ-диапазона, возбуждаемые при таких процессах. Эта информация особенно важна для животных, обитающих в зонах литорали и ближней сублиторали, поскольку позволяет им избежать возможной гибели в период шторма.

### 2.3 Вероятные механизмы предчувствия гидробионтами изменений гидрометеорологических условий в среде обитания

Как уже говорилось ранее в работе, ЕЭМП КНЧ-диапазона для многих живых существ, а в частности гидробионтов, являются почти единственным источником информации о биологически значимых опасных явлениях. Однако как показали последние исследования [49], восприятие вариаций электрического поля, возбуждаемых гидрометеорологическими процессами напрямую или опосредованно через ПеМП этих процессов, является не единственным механизмом предчувствия гидробионтами их приближения. Оказалось, что достаточно значимую роль играет прямая рецепция сверхслабых ПеМП (единицы и десятки нТл), возбуждаемых гидрометеорологическими процессами. Кроме того, была выявлена высокая чувствительность некоторых гидробионтов к ПеМП в области ГМВ.

Рассматривая вопрос о вероятных механизмах предчувствия, следует вспомнить имя такого выдающегося ученого как А. Л. Чижевский, который впервые занялся проблемами связи биологических процессов и солнечной активности и ввел понятие до сих пор еще не разгаданного Z-фактора, пытаясь объяснить механизм предчувствия солнечных вспышек [50,51]. На примере коринебактерий было показано, что некоторые организмы "чувствуют" солнечные вспышки за 4-5 дней до наблюдения их астрофизическими методами, почти за неделю до начала соответствующих геомагнитных возмущений. Таким образом, Чижевский предположил, что некоторое неизвестное Z-излучение исходит из глубинных слоев Солнца и предшествует началу регистрируемых изменений активности (появление пятен). Поэтому можно предположить, что этот Z-фактор влияет на многие процессы, происходящие на Земле.

Реакция биообъектов на магнитные бури, а также существование некоторого Z-излучения могут объясняться резонансным откликом важнейших органов и систем живого организма на усиление длиннопериодных колебаний МПЗ как во время бурь, так и в некоторых случаях – до них. Причиной возникновения предбуревых длиннопериодных осцилляций геомагнитного поля может являться смена осцилляторного режима солнечного ветра за несколько дней до прихода геоэффективных потоков солнечного ветра к Земле.

### 3. Разработка новых технологий проведения физических экспериментов с гидробионтами

#### 3.1 Новые экспериментальные установки для проведения исследований

##### 3.1.1 Установка для определений двигательной активности сомовых рыб при воздействии переменного электрического поля

Для изучения влияния электромагнитных полей на ДА гидробионтов в качестве подопытных биологических систем использовались небольшие скопления золотистых сомов (*Corydoras aeneus*), как представителей электрочувствительных рыб. Следует отметить, что исследования проводились с рыбами различных возрастных категорий, а также не учитывалась половая принадлежность, поэтому можно говорить об универсальности полученных данных. Эксперименты проводились в продольном бассейне длиной 186см, разделенном внешними отметками на 4 одинаковые секции А, В, С, D. (Рисунок 3.1).

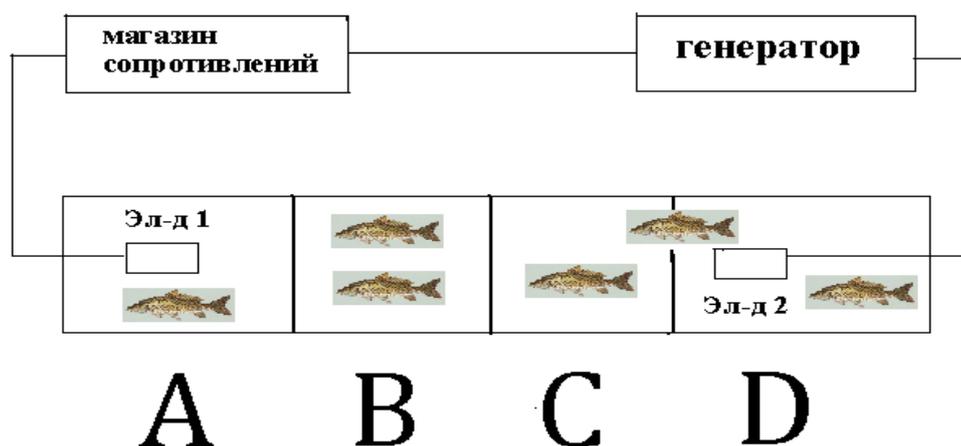


Рисунок 3.1 – Схема установки с продольным аквариумом.

Моделируемое электрическое поле в бассейне создавалось с помощью пластинчатых электродов. Эксперименты проводились при частотах: 0,5; 1; 2; 4; 7 Гц. Напряжение создаваемое в экспериментальном бассейне составляло 0,5 В, соответственно, напряжённость электрического поля была равна 2,7 мВ/см.

### 3.1.2 Установка для определений двигательной активности сомовых рыб при воздействии переменного магнитного поля

ПеМП в бассейне создавалось с помощью соленоида. Экспериментальный бассейн располагался внутри соленоида. Схема и общий вид установки представлены на рисунках 3.2 и 3.3. Исследование проводилось при частотах: 0,5; 1; 2; 4; 7; 10 Гц.

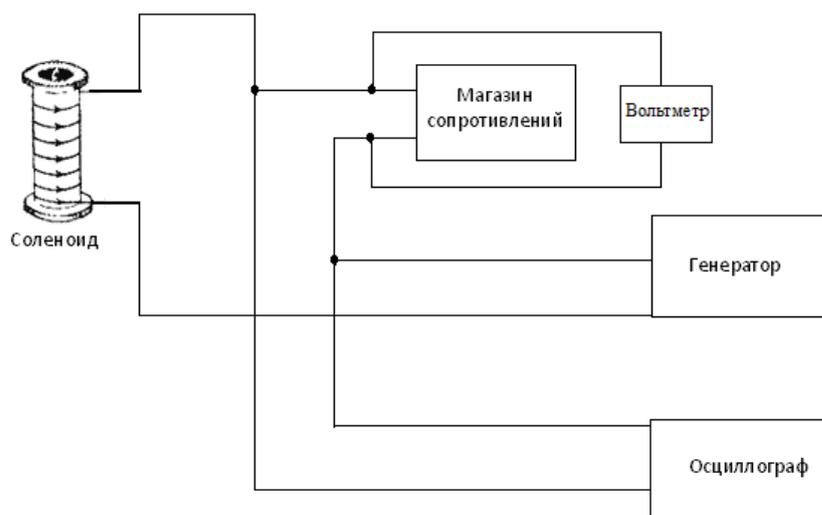


Рисунок 3.2 – Схема установки.



Рисунок 3.3 – Общий вид установки.

При задаваемой силе тока 25 мкА магнитная индукция составляла 100 нТл.

### 3.1.3 Автоматизированное определение двигательной активности карповых и сомовых рыб с помощью видеокамеры

Для изучения влияния ГМВ на ДА гидробионтов были выбраны карповые рыбы как наиболее распространенные в системах аквакультуры, однако для некоторых экспериментов были взяты сомики золотистые, в качестве наиболее доступного вида сомовых рыб. Исследования проводились в экспериментальном бассейне с размерами 260x370x165мм, который разделен на шесть одинаковых секций А, В, С, D, F, Е (Рисунок 3.4). Впервые в ходе эксперимента была использована автоматическая система регистрации видеокамерой, размещенной над бассейном с возможностью одновременного наблюдения всей акватории, при этом видеокамера была подключена к управляемому таймеру покадровой съемки с последующей передачей полученных кадров изображения ДА гидробионтов на персональный компьютер для дальнейшего анализа [52]. Техническим результатом данного решения является возможность автоматической регистрации перемещений гидробионтов в лабораторном бассейне через задаваемые временные интервалы и в течение длительного времени.

Схема установки приведена на рисунке 3.5, а на рисунке 3.7 – ее фотография. На рисунке 3.6 показана картинка видеоизображения расположения рыб при съемке.

А	В	С
D	Е	F

Рисунок 3.4 – Схема разделения экспериментального аквариума на секции.

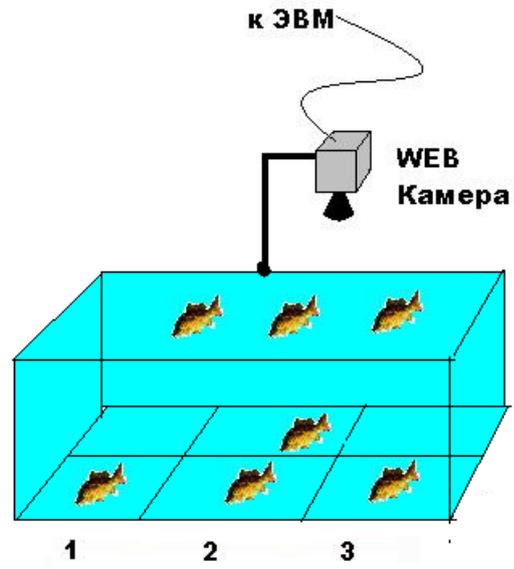


Рисунок 3.5 – Схема установки.



Рисунок 3.6 – Пример видеозображения.

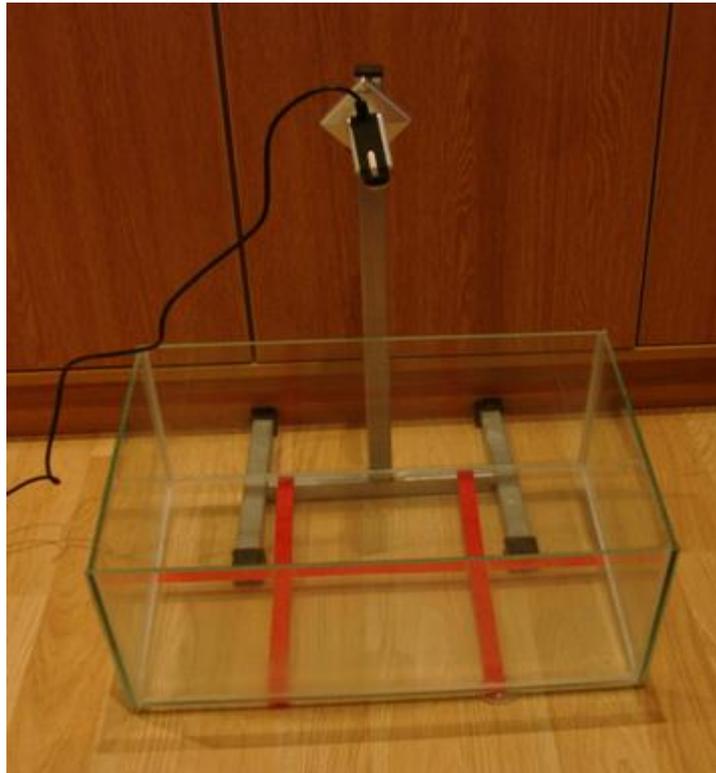


Рисунок 3.7 – Фотография экспериментальной установки.

На каждом видеокadre определялось количество рыб в разных секциях аквариума. Если рыба фиксировалась на границе секций, то к каждой из граничных секций добавлялось значение 0,5. Изменчивость расположения рыб от одного видеокadre до последующего характеризовало интенсивность перемещений в единицу времени (1мин), которая интерпретировалась как ДА  $R_i$ . Изменчивость характеристики  $R_i$  за все время эксперимента анализировалось в связи с действующими естественными или искусственными факторами. Освещенность бассейна, температура и состав воды сохранялись постоянными.

В качестве биологических объектов исследовалась стая из 8 рыб. Период адаптации составил 15-20 минут после перемещения рыб в экспериментальный бассейн. Эксперименты проводились при различных геомагнитных и погодных условиях. Данные о геомагнитных возмущениях на время экспериментов использовались из обсерватории Соданкюля (Финляндия) ([www.sgo.fi](http://www.sgo.fi)). Данные о характере погоды были взяты с сайта метеорологического центра Германии ([www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)), а также из синоптических карт Северо-Западного Управления Росгидромета.

### 3.1.4 Автоматический метод регистрации двигательной активности камчатских крабов

Исследования проводились на лабораторной установке в Мурманском морском биологическом институте Кольского научного центра РАН (Рисунок 3.8). Данная установка позволяла регистрировать ДА крабов в автоматическом режиме. В качестве регистратора в первой серии экспериментов применялся скоростной самописец, во второй серии – персональный компьютер (ПК) с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) на входе. Искусственные магнитные поля создавались с помощью соленоида, в который помещался бассейн с крабом. Соленоид подключался к генератору крайне низких частот. Магнитное поле в соленоиде соответствовало естественным полям.

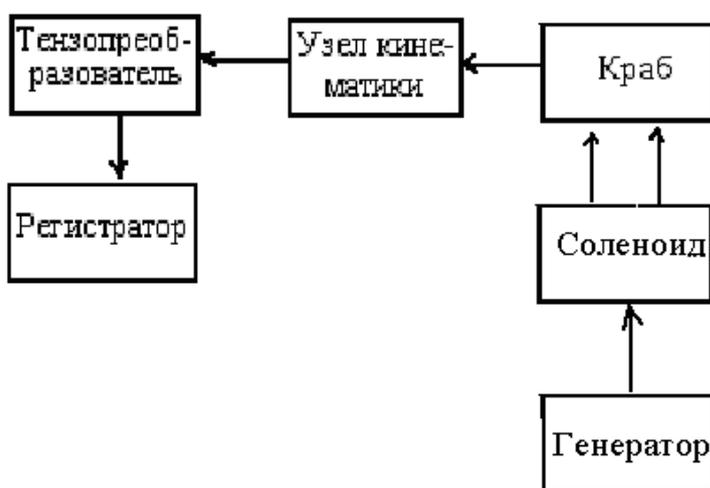


Рисунок 3.8 – Конструкция лабораторной установки.

Как следует из приведенного описания лабораторной установки, помещенные в нее крабы испытывают влияние внешних условий сравнимое с условиями их естественного места обитания. Для проведения экспериментов использовались камчатские крабы, адаптированные к условиям пребывания в Баренцовом море. Регистрация ДА велась в автоматическом режиме.

Для исследования воздействия искусственного переменного магнитного поля вокруг бассейна размещался соленоид, по которому пропускался ток крайне низкой частоты на задаваемых дискретно частотах. Частоты выбирались из диапазона от 0,1

Гц до 15 Гц. Соответственно, магнитное поле в соленоиде рассчитывалось по величине пропускаемого тока.

### 3.2 Методики проведения экспериментов

Суть методики проведения экспериментов с карповыми и сомовыми рыбами заключалась в следующем: в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$  определялось количество особей в каждой секции. Определение ДА начинались через 20-30 минут после помещения рыб в бассейн для их адаптации. Опыты проводились с дискретностью 1 мин.. Если рыб в какой-либо секции не было в момент регистрации, то это состояние обозначалось 0. Длительность каждого эксперимента составляла не менее 3 часов. В случае с ПеМП и ПеЭП определялись реакции сомовых рыб на отсутствие воздействия поля (первый контроль), на предъявление поля (реакция) и на повторное отсутствие воздействия (второй контроль).

Расчет ДА проводился по формуле (3.1), где ДА представляет собой сумму всех разностей пары отсчетов  $+0.1$  для каждого слагаемого:

$$\Delta a + \Delta b + \Delta c + \Delta d = R_i \quad (3.1)$$

где  $\Delta a = |(a_i - a_{i+1})| + 0,1$ ;  $\Delta b = |(b_i - b_{i+1})| + 0,1$ ;  $\Delta c = |(c_i - c_{i+1})| + 0,1$ ;  
 $\Delta d = |(d_i - d_{i+1})| + 0,1$ .

Здесь  $R_i$  – характеристика активности перемещения рыб из секции в секцию; ед. ДА, при количестве рыб  $N = \text{const}$ ;  $a, b, c$  и  $d$  с индексами  $(i)$  и  $(i+1)$  – количество рыб в каждой из секций в моменты времени  $i$  и  $i+1$ , соответственно.

Следовательно, получаемые ряды  $R_i$  характеризуют ДА рыб и ее изменчивость за время эксперимента.

Исходные ряды активности крабов были получены путем проведения экспериментов в бассейне (п 3.1.4). При выполнении экспериментов кроме измерений самой ДА крабов определялись такие факторы, как атмосферное давление, температура воздуха, типы барических образований над исследуемой областью. Как уже упоминалось ранее, атмосферные условия оказывают не прямое

влияние на поведение животных, а косвенное – за счет формирования ЭМП КНЧ-диапазона, способных проникать в морскую воду на сравнительно большие глубины (до 100 м). Также при проведении исследований учитывалась освещенность, поскольку часть жизненной активности изучаемого вида крабов происходит весной и летом на малых глубинах, куда проникает достаточное количество дневного света. Это показывает необходимость учета ряда факторов при проведении анализа, в противном случае могут быть сделаны неверные выводы.

### 3.2.1 Критерии подобия при моделировании воздействия электромагнитных полей гидрометеорологических процессов на гидробионтов

Задача поиска критериев подобия при моделировании воздействия внешних факторов на биологические объекты является весьма нетривиальной. Действительно, ранее подобные вопросы просто не рассматривались: считалось как бы само собой разумеющимся, что воздействие в лабораторных условиях является полностью адекватным воздействию при изменчивости природных факторов. В частности, это напрямую касается воздействия электромагнитных ЭМП КНЧ-диапазона на биологические системы (БС).

Однако ряд имеющихся экспериментальных данных, в том числе – данные автора, позволяет усомниться в подобной адекватности. Это приводит к задаче поиска наиболее целесообразных условий моделирования воздействий с соответствующими критериями подобия.

Ее решение, по-видимому, возможно лишь путем последовательных приближений. В силу многих неясностей с механизмами восприятия биологическими объектами ЭМП критерии подобия в настоящее время не могут быть однозначно сформулированы. На основании имеющихся данных любой из подобных объектов целесообразно рассматривать как некоторую *динамическую систему*, описываемую в общем случае – нелинейным, а в частном случае – линейным дифференциальным уравнением  $n$ -го порядка [3.2]:

$$T_n^n \frac{d^n R(\tau)}{d\tau^n} + T_{n-1}^{n-1} \frac{d^{n-1} R(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + T_1 \frac{dR(\tau)}{d\tau} + R(\tau) = K_{R/x} X(\tau), \quad (3.2)$$

где  $T$  – коэффициент (в соответствующей степени), имеющий размерность времени и эквивалентный техническому понятию «постоянная времени»;

$R(\tau)$  – реакция биообъекта на воздействие;

$X(\tau)$  – воздействующий сигнал;

$K_{R/x}$  – коэффициент соотношения реакция/сигнал в статическом режиме.

В простейшем случае системы первого порядка это становится уравнением [3.3]:

$$T_1 \frac{dR(\tau)}{d\tau} + R(\tau) = K_{R/x} X(\tau) \quad (3.3)$$

Такой подход к рассмотрению является наиболее продуктивным, поскольку позволяет увязать спектральные характеристики воздействующих сигналов и спектральные характеристики реакций. Решение уравнения находится путем введения комплексной передаточной функции  $F(i\omega)$ , составляющими которой являются: амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), т.е. модуль  $|F(i\omega)|$ , и фазово-частотная характеристика (ФЧХ) –  $\phi(i\omega)$ . Отмеченная выше связь спектральных характеристик воздействующих сигналов и реакций гидробионтов при таком рассмотрении будет выражаться в виде [3.4]:

$$S_R(\omega) = |F(i\omega)|^2 S_x(\omega), \quad (3.4)$$

где  $S(\omega)$  – функции спектральной плотности реакции или сигнала в соответствии с индексом.

Кроме спектральных искажений в экспериментах «воздействие-реакция» возникают фазовые искажения. Они оцениваются ФЧХ динамической системы. В случае простейшей линейной системы первого порядка ФЧХ имеет вид [3.5]:

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega T_1) , \quad (3.5)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;

$T_1$  – постоянная времени (промежуток времени, за который исходная разность между воздействием и реакцией уменьшится в «e» раз). Подробнее об этом можно посмотреть в работе [10].

Все это, по-прежнему, при  $K_{R/x} = 1$ , а фазовый сдвиг – в угловых градусах. Однако представляется, что биологические системы вряд ли описываются линейными дифференциальными уравнениями. Какой-либо принципиальной новизны в этом нет – нелинейные динамические связи в биологических системах изучались, например, применительно к биологическим мембранам и различным видам биохимических реакций (см. например [53]). Тем не менее, использовать эти результаты в задачах анализа поведения животных, в частности – гидробионтов, не представляется возможным. Необходим некоторый более общий подход. И, по-видимому, наиболее разумно рассматривать такие объекты, а также группы объектов, как кибернетический «черный ящик» с известным сигналом  $X(\tau)$  на входе (воздействующий фактор) и регистрируемой реакцией  $R(\tau)$  на выходе (рисунок 3.9).

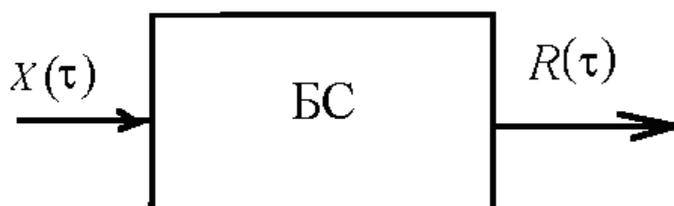


Рисунок 3.9 – Биологическая система БС (объект, группа объектов) как «черный ящик».

Ранее такой подход уже предлагался в работе [12]. При этом рассматривались не только линейные динамические свойства БС, но и предполагалось наличие нелинейных свойств. Однако экспериментальные подтверждения были приведены лишь для физико-химических систем. В настоящей работе рассматриваются

результаты изучения нелинейных динамических свойств у БС (объект, группа объектов).

Физический смысл рассматриваемого подхода состоит в том, что биологический объект, на наш взгляд, не может реагировать на любые кратковременные изменения внешних факторов  $X(\tau)$  (на «любой чих»), поскольку отсутствует хоть какой-либо смысл таких реакций – слишком большая «пугливость» никак не является достоинством в биологическом мире. Реакция формируется лишь после определенной длительности воздействия («накопление информации»), вопрос же: а какой именно длительности, – подлежит изучению. Реакция может формироваться в самом простейшем случае просто с задержкой во времени – тогда в приведенном уравнении следует учитывать лишь первую производную. Реакция может иметь более сложный характер, в том числе – с резонансными эффектами, тогда необходимо учитывать старшие производные. И в том и в другом случае необходимо учитывать нелинейные эффекты.

В биофизических исследованиях введен так называемый «латентный период». Обычно это *время между началом действия некоторого раздражителя и возникновением ответной реакции*. При изучении реакций гидробионтов латентные периоды определялись лишь на воздействие постоянным фактором, т.е. сигналом прямоугольной формы («стимулом»), величина которого не меняется во времени (см. например [19]). Там же [19] рассматривается различие реакций гидробионтов на полярность действующего стимула. Различия в полярности определены как «анодический стимул» и «катодический стимул», при этом наблюдались реакции, противоположные по знаку («торможение» либо «возбуждение»).

При переменных знаках «стимулов», соответственно, формируются переменные виды реакций, т. е. реакции «отслеживают» изменения стимулов (см. там же [19]). Эти «отслеживающие» изменения наблюдаются при очень низких частотах.

Однако в наших исследованиях использовались переменные во времени стимулы различных, в том числе – повышенных, частот, например ПеЭП либо ПеМП, и за период воздействия полярность стимула многократно изменялась (см.

данные п 4.2.2, 4.2.3 и 4.4). Если бы реакции на изменение полярности были одинаковыми по величине и противоположными по виду («возбуждение» или «торможение какой-либо функции, например ДА), то общего результата воздействия *знакопеременным* стимулом не было бы.

Однако результаты воздействия уверенно выявляются как в электрическом, так и в магнитном полях различных частот.

Понятие «латентный период», строго говоря, применяется лишь при воздействии на БС *не меняющихся во времени* факторов. Применять его к реакциям на знакопеременные факторы с нулевой постоянной составляющей, по-видимому, не совсем корректно, и в данной работе используется термин «задержка реакции».

#### *Нелинейные динамические свойства. Теоретическое рассмотрение.*

Тогда получается, что динамические свойства гидробионтов как БС не могут являться линейными, т.е. соответствующими уравнениям (3.2) или (3.3), и их реакция на знакопеременный сигнал может быть обусловлена *только нелинейностью динамических свойств*.

Нелинейность динамических свойств применительно к БС наиболее вероятна в следующем: *реакция на возрастание действующего фактора существенно быстрее, чем реакция на его падение*. Это представляется вполне естественным. Действующий фактор несет в себе некоторую *потенциальную* опасность, на нее надо реагировать быстрее (но не сразу!). Уменьшение же фактора означает снижение опасности, но еще как бы действует "память" об этой потенциальной опасности, из-за чего реакция оказывается более медленной. Для фактора, действующего переменным образом (например, в виде вариаций магнитного поля) получается *кумулятивный* эффект, как это показано на рисунке 3.10. Собственно, это и является результирующей реакцией БС.

На рисунке 3.10 воздействующий переменный фактор представлен в виде знакопеременных *прямоугольных* импульсов постоянной частоты следования со скважностью, равной 2. Как правило, отдельные импульсы такого типа

(«анодический» либо «катодический» «стимулы») используются в традиционных биофизических экспериментах с гидробионтами.

«Прямоугольность» в нашем случае принципиального значения не имеет. Она использована для наглядности. Тот же самый кумулятивный эффект формируется при синусоидальном стимуле.

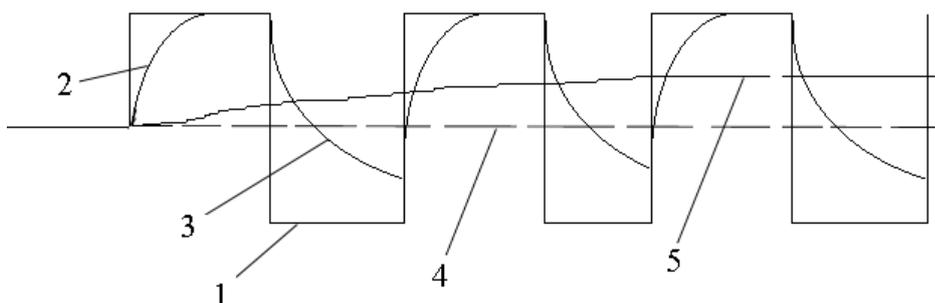


Рисунок 3.10 – Схема формирования кумулятивного эффекта. Обозначения: 1 – знакопеременный стимул; 2 – реакция на возрастание действующего фактора; 3 – реакция на уменьшение этого фактора; 4 – среднее значение фактора; 5 – кумулятивная реакция БС.

Реакции в виде экспонент 2 и 3 являются решениями простых линейных дифференциальных уравнений 1-го порядка (3.3) при различных постоянных времени.

Эти решения выглядят следующим образом [3.6]:

$$R_p(\tau - \tau_{0p}) = X_m + (X_0 - X_m)e^{-\frac{\tau - \tau_{0p}}{T_p}} ; \quad (3.6)$$

$$R_n(\tau - \tau_{0n}) = X_0 + (X_m - X_0)e^{-\frac{\tau - \tau_{0n}}{T_n}} ;$$

где индексы "р" и "п" относятся к росту воздействующего фактора ("р") и его падению ("п");

$X_m$  – верхнее значение воздействующего фактора;

$X_0$  – его нижнее значение;

$\tau_0$  с соответствующими индексами – моменты начала роста или падения воздействующего фактора.

$\tau$  – время.

$T$  – постоянные времени с соответствующими индексами.

Различия констант  $T$  при росте ( $T_p$ ) и падении ( $T_n$ ), собственно, и определяют эффект накопления.

Среднее значение 4 переменного воздействующего фактора 1 (Рисунок 3.10) остается здесь неизменным, но реакция биологической системы 5 на начальном этапе воздействия растет до некоторого асимптотического значения и далее при неизменности частоты воздействующего фактора остается постоянной.

Естественно то, что изображено на рисунке 3.10, является всего лишь частным случаем. На это необходимо обратить внимание, поскольку *здесь насыщение* системы за счет кумулятивного эффекта происходит всего лишь *за несколько периодов* воздействующего переменного фактора.

Рассмотрим ситуацию, когда различия между  $T_p$  и  $T_n$  существенно меньше. Она не столь наглядна, как на рисунке 3.10, но результаты решения уравнения (3.3) получаются аналогичными. Однако за полупериод кривая 2 *не успевает* выйти на асимптотическое значение  $X_m$  воздействующего фактора (Рисунок 3.10). Соответственно, как и ранее, ведет себя и кривая 3. В таком случае возникает как бы *затягивание* кумулятивного эффекта. При этом асимптотическое значение реакции 5 биологического объекта получается через *существенно большее* количество периодов воздействующего фактора, причем, чем меньше различия, тем больше периодов должно пройти. Это чрезвычайно важный аспект, ведь в настоящее время мы практически не имеем представления о значениях констант  $T_p$  и  $T_n$  при рассмотрении биологического объекта как нелинейной динамической системы.

Поэтому невозможно *судить* о конкретных свойствах подобной системы, можно лишь *предполагать* эти свойства.

Тем не менее, можно полагать, что реакция на знакопеременный стимул не может возрастать до бесконечности, а только до асимптотического значения, которое уместно назвать *максимально ожидаемой реакцией*.

*Критерии.* В данной работе критерии подобия предлагаются только в приближении эффектов первого порядка, соответствующих решениям (3.6) уравнения (3.3). В естественных условиях, например, при приближении циклона существует длительный период воздействия ЭМП. Обозначим такой период как  $T_{\text{п}}$ . Соответственно, накопление реакции связано с этой длительностью и действующей напряженностью ЭМП (электрического или магнитного). В условиях лабораторного эксперимента задавать подобные периоды малопродуктивно.

Если в лабораторных условиях задавать период  $T_{\text{л}} \ll T_{\text{п}}$ , то критерии подобия будут выражены в виде [3.7]:

$$T_{\text{п}} B_{\text{мп}} = T_{\text{л}} B_{\text{мл}}, \quad (3.7)$$

где  $B_m$  с соответствующим индексом – амплитудное значение индукции переменного магнитного поля, а индексы означают: лабораторное («л») и природное («п») значения характеристик.

При моделировании воздействия переменным электрическим полем аналогичные критерии будут следующими [3.8]:

$$T_{\text{п}} \varepsilon_{\text{отн}}^{\text{п}} E_{\text{мп}} = T_{\text{л}} \varepsilon_{\text{отн}}^{\text{л}} E_{\text{мл}} \quad (3.8)$$

где  $\varepsilon_{\text{отн}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость (с соответствующими индексами) среды в которую помещены гидробионты;

$E_m$  – амплитудное значение напряженности воздействующего переменного электрического поля.

Критерий (3.7) можно проиллюстрировать следующим образом.

При среднем значении индукции переменного магнитного поля приближающегося циклона примерно 5-10 нТл и времени его приближения примерно 20 часов (средняя скорость около 30 км/час) получается следующее. В экспериментах по моделированию реакций на приближение поля циклона (длительность воздействия 1 час) необходимо повышать индукцию в примерно в 20 раз, т.е. задавать ее примерно равной 100-200 нТл на «действующей» частоте ЭМП циклона примерно 6-8 Гц.

Критерии (3.7) и (3.8) приведены при условии адекватности действующих частот на модели и в природе. Задавать различные частоты представляется некорректным.

### 3.3 Методики обработки полученных экспериментальных данных

#### 3.3.1 Спектральный и кросс-спектральный анализы

Обработка полученных рядов поведенческой активности, а также рядов магнитной индукции по оси  $X$  ( $B_x$ , нТл) проводилась в статистическом пакете **Mesosaur**. Для выделения полезного сигнала использовался полосно-пропускающий фильтр, который позволял выявить в исходной выборке определенную, необходимую для работы полосу частот. После фильтрации были построены графики рядов ДА рыб и магнитной индукции  $B_x$ . Из сглаживающих фильтров использовался цифровой фильтр – скользящее среднее. Алгоритм его вычисления прост: складываются  $N$  последних значений ряда, и сумма делится на  $N$ .

При обработке значений ДА строились и анализировались графики этих значений, а также функции спектральной плотности, которая описывает разложение полной дисперсии ряда по различным частотным составляющим. Также проводились оценки основных моментов распределения полученных данных (среднее, дисперсия). С помощью кросс-спектрального анализа сглаженных рядов поведенческой активности и магнитной индукции определялось наличие или отсутствие гармонических составляющих динамики в исследуемых рядах, а также оценивалась теснота связи между рядами (через функцию когерентности).

#### 3.3.2. Оценки и анализ фрактальных размерностей изучаемых процессов

Для определения степени детерминированности поведения рыб в период эксперимента производились вычисления фрактальной размерности процесса с использованием методов теории фракталов [54]. Размерность связана с так называемым показателем Херста  $H$  и определяется как разность  $(2-H)$ . Показатель Херста описывается эмпирическим соотношением [3.9]:

$$H = \log_{(\tau/2)}(R/S) \quad (3.9)$$

где  $H$  – показатель Херста;  $\tau$  – временное «окно»;  $R$  – размах, т.е. разность максимального и минимального значений за рассматриваемый интервал времени;  $S$  – стандартное отклонение. На практике значение  $H$  определяется по наклону прямой, аппроксимирующей зависимость  $\lg(R/S)$  от  $\lg(\tau)$  [3.10]:

$$\lg(R/S) = H \lg(\tau) + const \quad (3.10)$$

Для процесса независимых испытаний  $H=0,5$ . При  $H>0,5$  временной ряд имеет персистентное (поддерживающееся) поведение. То есть процесс является детерминированным. Вычисления велись с использованием оригинального программного пакета «Herst».

Последующая обработка данных эксперимента состояла в построении графиков зависимости показателя Херста и дисперсии поведенческой активности от воздействующего фактора.

### 3.3.3 Методика выявления реакций гидробионтов при искусственном воздействии электрическими и магнитными полями

Поскольку получаемые в этих экспериментах временные ряды являются, в принципе, нестационарными, то их обработка не может вестись стандартными методами. Весьма полный обзор методов обработки нестационарных временных рядов дан в монографии [55].

Естественно, в данной работе не могли быть использоваться все возможные методы. Наиболее интересными для поставленных в данной работе задач являются следующие:

- разбиение нестационарных рядов на квазистационарные отрезки и обработка этих отрезков по известным методикам (например [56]);
- использование дисперсии квазистационарных отрезков в качестве индикатора появления групповых аномалий (здесь – реакции гидробионтов на внешний фактор) [57].

В работе [57] для выявления «групповых аномалий» предлагается использовать отношение дисперсий, а в качестве критерия выделения аномалий используется изначально заданные значения такого отношения. Несомненно, что это очень интересно для временных рядов с низким отношением «сигнал/шум», т. е. для задач выявления слабых «групповых сигналов» на фоне сильных шумов. Однако в выполнявшихся нами экспериментах момент воздействия точно фиксировался, поэтому было более целесообразно использовать разность дисперсий.

Результат воздействия определялся как [3.11]

$$\Delta = (D_p \pm \sigma_{D_p}) - (D_\phi \pm \sigma_{D_\phi}) \quad (3.11)$$

где  $D_p$  – дисперсия двигательной реакции;  $D_\phi$  – дисперсия фона;  $\sigma_{D_p}$  и  $\sigma_{D_\phi}$  – значения средних квадратических отклонений рассчитанных рядов дисперсий.

Критерием формирования реакции на воздействие являлось условие  $\Delta \geq 2\bar{\sigma}_D$ , где  $\bar{\sigma}_D = \sqrt{\sigma_{D_p}^2 + \sigma_{D_\phi}^2}$ .

Это обеспечивало выделение двигательной реакции на воздействие внешним полем с доверительной вероятностью 0,95 при плотности вероятности распределений дисперсий фона и реакции, близкой к нормальному закону.

Кроме того, эксперименты с живыми подвижными объектами требуют учета задержки реакции (в биологии это называют «латентным периодом»). Действительно, живой объект (рыбы) не могут реагировать на какие-либо импульсные изменения внешних факторов. Поэтому квазистационарные участки выделялись с учетом этого условия. Т.е., если квазистационарность захватывала латентный период, то это учитывалось при расчетах дисперсии фона.

В экспериментах с менее подвижными животными (камчатские крабы) также была применена рассмотренная выше методика [58], однако при этом была использована фильтрация рядов с последующим их сведением к стационарности «в узком смысле», т.е. с постоянством оценки матожидания.

В наших задачах было решено использовать те же исходные данные, но без какой-либо фильтрации и выявлять не дисперсии, а интенсивности реакции при различных частотах воздействия.

Интенсивность реакции определялась как разность [3.12]

$$\Delta_R = (\overline{ДА}_R \pm \sigma_{ДА_R}) - (\overline{ДА}_F \pm \sigma_{ДА_F}) \quad (3.12)$$

где  $\overline{ДА}_R$  – средняя двигательная активность при воздействии;  $\overline{ДА}_F$  – средняя двигательная активность фона;  $\sigma_{ДА_R}$  и  $\sigma_{ДА_F}$  – средние квадратические отклонения рассчитанных рядов  $\overline{ДА}$ .

Критерий наличия реакции использовался аналогичный критерию по дисперсиям:  $\Delta_K \geq 2\overline{\sigma_{ДА}}$ , где  $\overline{\sigma_{ДА}} = \sqrt{\sigma_{ДА_R}^2 + \sigma_{ДА_F}^2}$ .

*Оценка доверительных интервалов.*

Ряды дисперсий и ДА рассчитывались обычно по 20-ти точкам со сдвигом между отрезками на задаваемый шаг (обычно на 1 мин). Обработка велась с применением современных метрологических методов [59-61].

То есть, например [3.13]:

$$D_{i+10} = D_{i \div 20} \pm \sigma_{D_i} \quad (3.13)$$

где  $D_{i+10}$  – значение, отнесенное к середине  $i$ -го отрезка ряда;  $D_{i \div 20}$  – вычисленное значение дисперсии отрезка ряда из 20-ти точек;  $\sigma_{D_i}$  – погрешность определения  $i$ -ой дисперсии.

Погрешность расчета каждого значения оценивалась, как [3.14]

$$\sigma_{D_i} = \pm 0,01 D_i \quad (3.14)$$

поскольку в рассчитанных значениях исключались все третьи и последующие значащие цифры [62].

В результате доверительный интервал расчета реакции по описанному выше критерию оценивалась следующим образом [3.15]:

$$\Delta_{\Delta} = \pm \frac{\sqrt{2\sigma_{D_i}^2}}{\sqrt{N}} \quad (3.15)$$

где  $\overline{\sigma_{D_i}} = \sqrt{\sigma_{D_{ip}}^2 + \sigma_{D_{if}}^2}$ , а индексы «р» и «ф» означают «реакцию» и «фон»,  $N$  –

количество отрезков, используемое для расчета дисперсий.

Это оказалось возможным применить, поскольку определения дисперсий в отрезках являлись *равноточными*, а ряды выделялись как *квазистационарные*. Эти два условия соответствуют метрологическим правилам оценки качества измерений [63].

Доверительная вероятность для интервала  $\Delta_{\Delta}$  составляла 0,95.

Приведенная методика применялась также и при оценках доверительных интервалов расчетов интенсивности реакций.

### 3.3.4 Вейвлет-анализ

Вейвлет-анализ представляет собой аппарат, приспособленный для изучения структуры неоднородных процессов. В отличие от преобразования Фурье вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развертку исследуемого одномерного сигнала, при этом частота и координата рассматриваются как независимые

переменные. В результате появляется возможность анализировать свойства сигнала одновременно в физическом (время, координата) и в частотном пространствах [64].

Подобно тому, как в основе аппарата преобразований Фурье лежит единственная функция  $w(t)=exp(it)$ , порождающая ортонормированный базис пространства  $L^2(0,2\pi)$  путем масштабного преобразования, так и вейвлет-преобразование строится на основе единственной базисной функции  $\psi(t)$ , имеющей солитоноподобный характер и принадлежащей пространству  $L^2(R)$ , т.е. всей числовой оси. В западной литературе за этой функцией закрепилось название "вейвлет", что означает "маленькая волна", в отечественной иногда ее называют "всплеском", отражая в этом названии и локализацию, и осцилляционный характер поведения. При конструировании базисной анализирующей функции  $\psi(t)$  должны выполняться следующие необходимые условия.

Локализация – вейвлет должен быть локализован вблизи нуля аргумента как во временном, так и в частотном пространстве.

Нулевое среднее [3.16]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3.16)$$

Как следствие, вейвлет должен быть знакопеременной функцией.

Ограниченность [3.17]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (3.17)$$

Вейвлет должен быть достаточно быстро убывающей функцией временной (пространственной) переменной.

Базис одномерного дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) строится на основе вейвлета  $\psi(t)$  посредством операций сдвигов и растяжений вдоль оси  $t$ .

Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) строится аналогичным образом с помощью непрерывных масштабных преобразований и переносов вейвлета  $\psi(t)$  с произвольными значениями масштабного коэффициента  $a$  и параметра сдвига  $b$  [3.18]:

$$W(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3.18),$$

где символ \* обозначает операцию комплексного сопряжения.

Таким образом, любая функция из  $L^2(R)$  может быть представлена суперпозицией масштабных преобразований и сдвигов базисного вейвлета с коэффициентами, зависящими от масштаба (частоты) и параметра сдвига (времени).

Двухпараметрическая функция  $W(a,b)$  дает информацию об изменении относительного вклада компонент разного масштаба во времени и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования.

Располагая вейвлет-спектром, можно рассчитать полную энергию сигнала [3.19]

$$E_f = \int f^2(t) dt = \iint W^2(a,b) \frac{da db}{a^2} \quad (3.19)$$

и глобальный спектр энергии – распределение полной энергии по масштабам (скейлограмму вейвлет-преобразования) [3.20]

$$E_w(a) = \int W^2(a,b) db \quad (3.20)$$

Скейлограмма соответствует спектру мощности Фурье-преобразования сигнала, сглаженному на каждом масштабе спектром Фурье анализирующего вейвлета [3.21]:

$$E_w(a) = \int \left| \hat{f}(\omega) \hat{\psi}(a\omega) \right|^2 d\omega \quad (3.21)$$

где знак  $\hat{\phantom{x}}$  обозначает Фурье-образ функции.

В настоящее время вейвлет-анализ начинает широко применяться в задачах распознавания образов; при обработке и синтезе различных сигналов, для свертки больших объемов информации и во многих других случаях.

Вейвлет-анализ оказывается очень удобным для анализа процессов с перемежаемостью. Он позволяет выявить пространственно распределенные свойства изучаемого объекта, определить наличие перемежаемости и распределение областей диссипации, получить локальную высокочастотную и глобальную крупномасштабную информацию об объекте и многое другое, достаточно точно и без избыточности.

## 4 Результаты выполненных исследований

### 4.1 Карповые рыбы

#### 4.1.1 Суточная изменчивость двигательной активности карповых рыб

Для задач выявления физических механизмов восприятия и оценки возможностей предчувствия гидрометеорологических процессов необходимо вначале определить физиологическую изменчивость активности – суточный ход ДА и ритмику поведения. Для этого использовались данные длительных (не менее суток) непрерывных наблюдений при неизменных внешних факторах (температура, рН воды, геомагнитные условия, гидрометеорологические факторы и др.), т.е. тех факторах, влияние которых выявилось в ранее проводившихся исследованиях (например, [65-67]). Температура задавалась 18-20°С, рН – в зоне толерантных условий 7-9,5, освещенность – постоянная, геомагнитные условия контролировались по текущим данным обсерватории Соданкюля (Финляндия), отсутствие сильной изменчивости гидрометеорологических факторов – по данным синоптических карт из общедоступного немецкого сайта: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de).

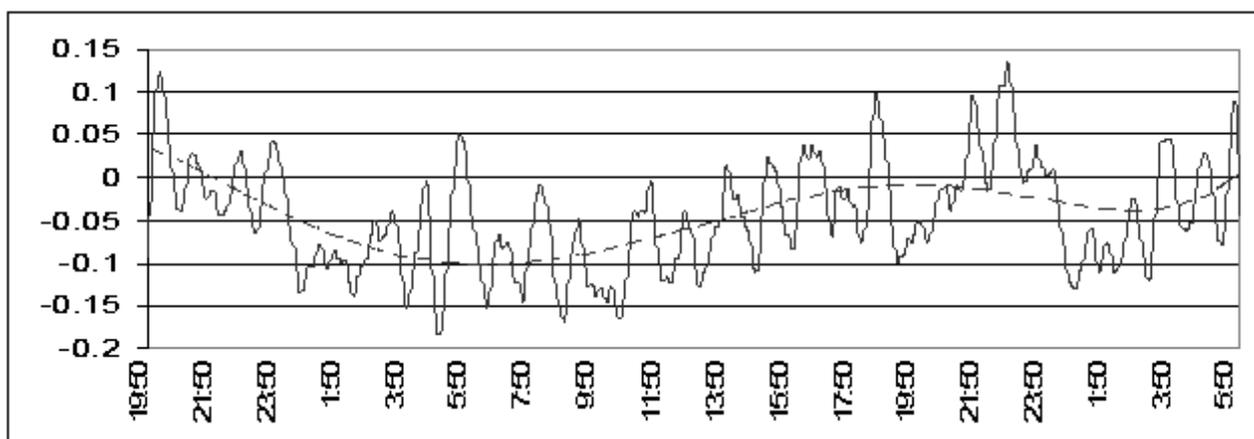


Рисунок 4.1 – Изменчивость ДА карповых рыб в течение суток (по оси X – показатель ДА, по оси Y – время эксперимента).

По рисунку 4.1 видно, что двигательная активность уменьшается в период с 20:00 до 6:00, что подтверждает наличие внутрисуточной биоритмики карповых рыб. Подъем активности карповых рыб после 06 часов был отмечен в работе [68]. Однако там размах суточных вариаций активности был выше. При этом, в отличие от рисунка 4.1, в работе [68] использовались ненормированные данные.

В проведенных сейчас опытах разница между средними значениями активности в дневное и ночное время составляет всего лишь 0.1 ед. поведенческой активности, соответственно, во время обработки данных не было никакой необходимости вводить поправочный коэффициент на время суток. Данный график скрывает короткопериодные случайные выбросы, сохраняя при этом общую тенденцию в поведении рыб.

С помощью вейвлет-анализа для суточного опыта с карпами был получен спектр двигательной активности, представленный на рисунке 4.2. На рисунке 4.3 данный спектр отражен в трехмерном пространстве. Для обработки ряда был использован пакет AutoSignal. На первом этапе был выбран базисный вейвлет. Были рассмотрены вейвлеты: Морле, Пауля и производной функции Гаусса. Минимальная среднеквадратическая ошибка была достигнута для производной восьмого порядка функции Гаусса. В этом случае разложение являлось оптимальным.

Анализ полученных изображений позволяет выявить в данной нестационарной структуре ряда диапазоны локальных периодичностей в поведении рыб с масштабами около 30 мин, 12-10 мин, 5-4 мин, что полностью подтверждает результаты классического спектрального анализа. Мелкомасштабная часть процесса с периодами менее 2-3 мин демонстрирует преобладание случайных процессов над периодическими.

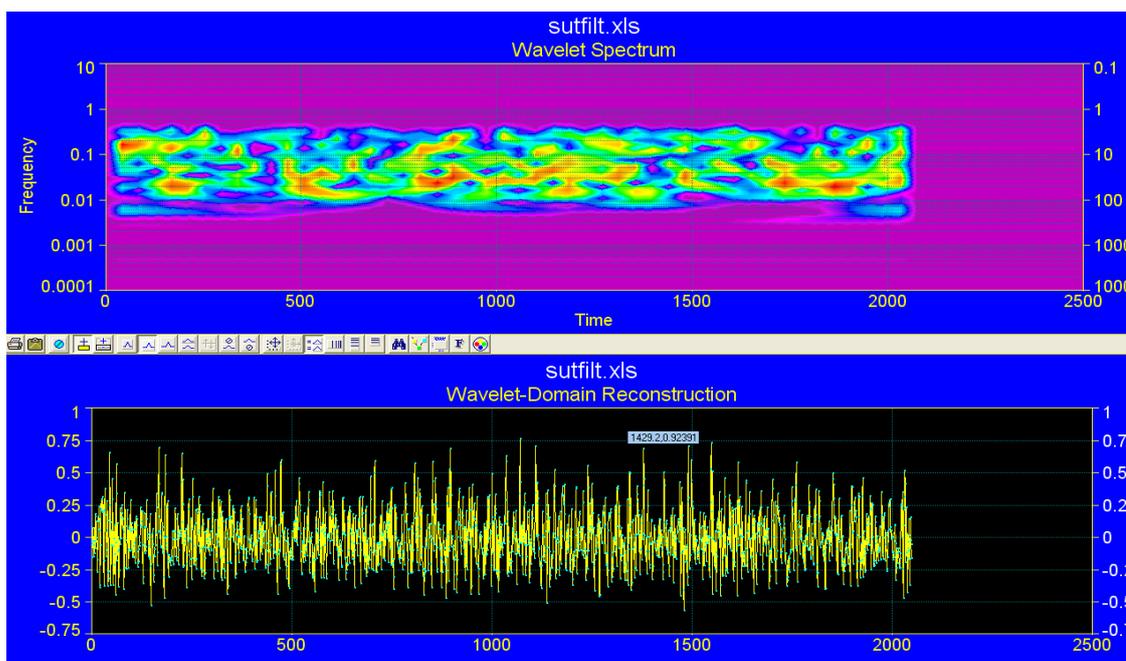


Рисунок 4.2 – Вейвлет-спектр ДА карповых рыб во время суточного эксперимента (верхний график) и фильтрованный ряд двигательной активности (нижний график).

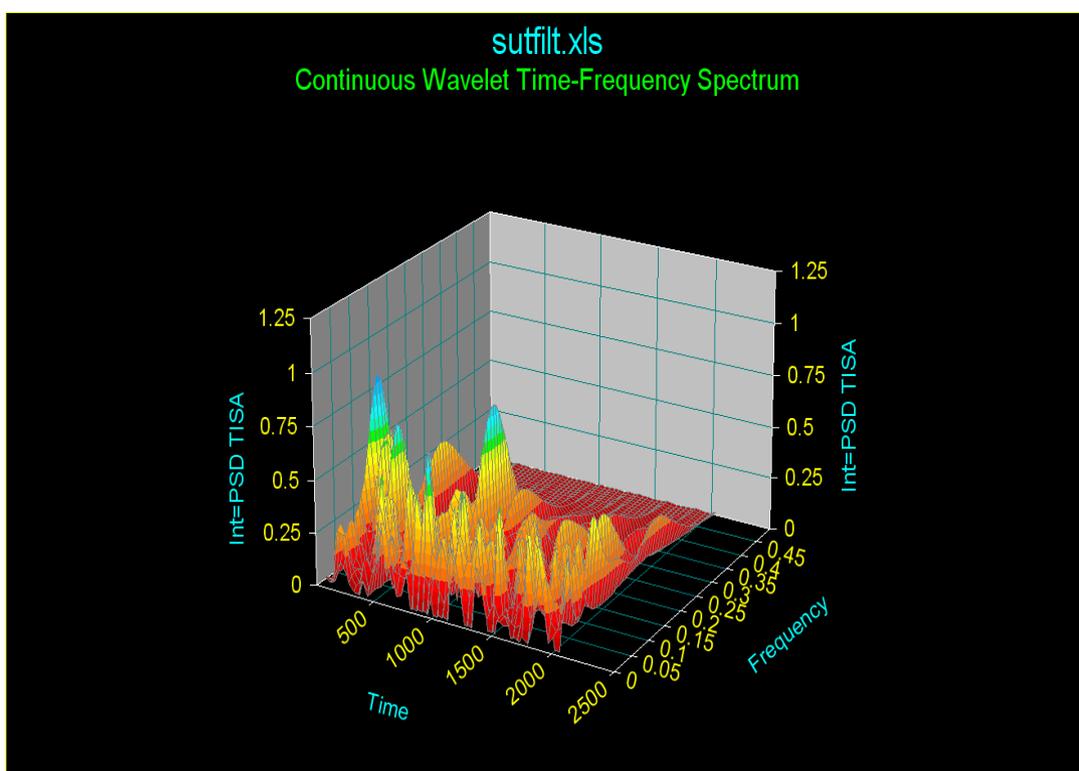


Рисунок 4.3 – Трехмерный спектр ДА карповых рыб во время суточного эксперимента.

#### 4.1.2 Оценки связи средних значений активности с геомагнитными возмущениями

В ходе проведенной серии экспериментов наблюдались магнитные бури средней интенсивности (до 250 нТл или K-индекс до 6). По полученным данным была проведена статистическая оценка рядов магнитной индукции (пример приведен на рисунке 4.4) и двигательной активности (пример приведен на рисунке 4.5). В процессе работы для наиболее удачных с точки зрения геомагнитной обстановки экспериментов оценивался коэффициент корреляции между средними значениями двигательной активности и размахом магнитной индукции  $K_c$  (Таблица 4.1). Для этого ряды данных были разделены на кусочки. Определяющим фактором для деления рядов по кусочкам был выбран ряд магнитной индукции.



Рисунок 4.4 – График изменения магнитной индукции (опыт 05.09.08).

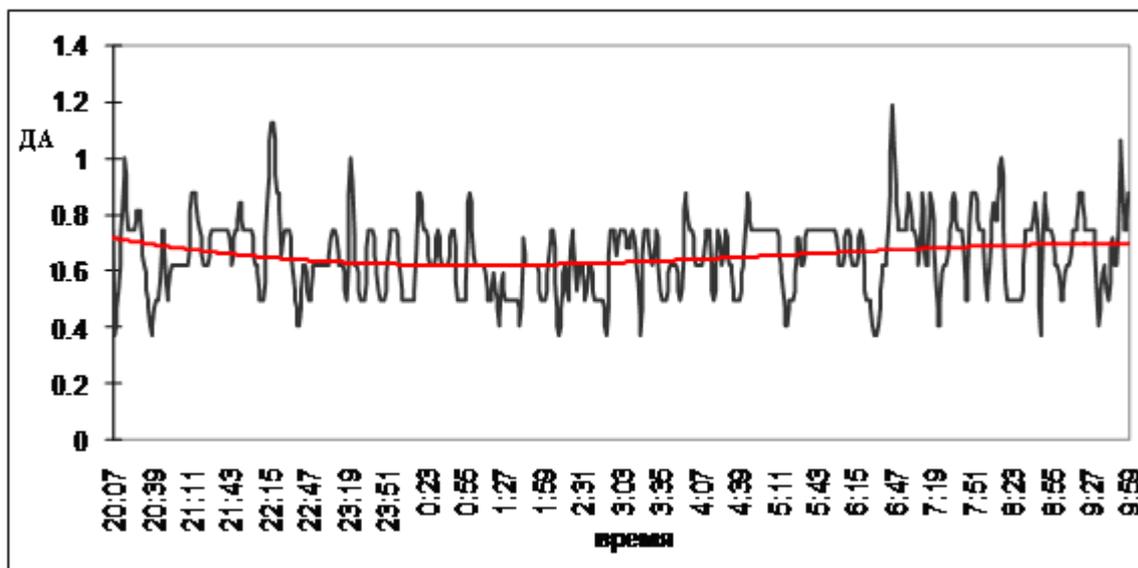


Рисунок 4.5 – ДА карповых рыб (опыт 05.09.08).

Таблица 4.1 – Значения коэффициента корреляции между рядами активности рыб и магнитной индукции (красным цветом отмечены значимые коэффициенты при уровне значимости 0.05)

Вид гидробионтов	Дата проведения опыта	Коэффициент корреляции R
Карпы	01.09.08 с 20:02 по 6:00	-0.4
Карпы	05.09.08 с 20:07 по 9:59	<b>-0.8</b>
Сомы	09.04.09 с 22:15 по 05:09	<b>0.85</b>
Сомы	09.04.09 с 14:50 по 16:52	<b>0.87</b>
Сомы	10.04.09 с 20:00 по 06:09	<b>0.7</b>

Таким образом, наибольший коэффициент корреляции для карповых рыб составил  $-0.8$ , при этом характерно, что для этих рыб свойственно снижение

двигательной активности во время увеличения вариаций магнитной индукции (о чем и свидетельствует знак "минус" коэффициента корреляции между рядами). Подобные результаты были получены в работе [68], максимальное значение коэффициента корреляции тогда составило -0.65. На рисунке 4.6 приведены обобщенные результаты определений ДА карповых рыб из работы [68] с наложением на них значений коэффициента геомагнитной возмущенности  $K_c$ . График был построен по данным 28 опытов, проведенных с карповыми рыбами. Каждый эксперимент длился 3 часа. Общее количество обработанных данных – более 5000 значений ДА и, соответственно, столько же значений индукции. Был установлен нелинейный характер связи средних значений ДА с интенсивностью геомагнитных возмущений (см. рисунок 4.7).

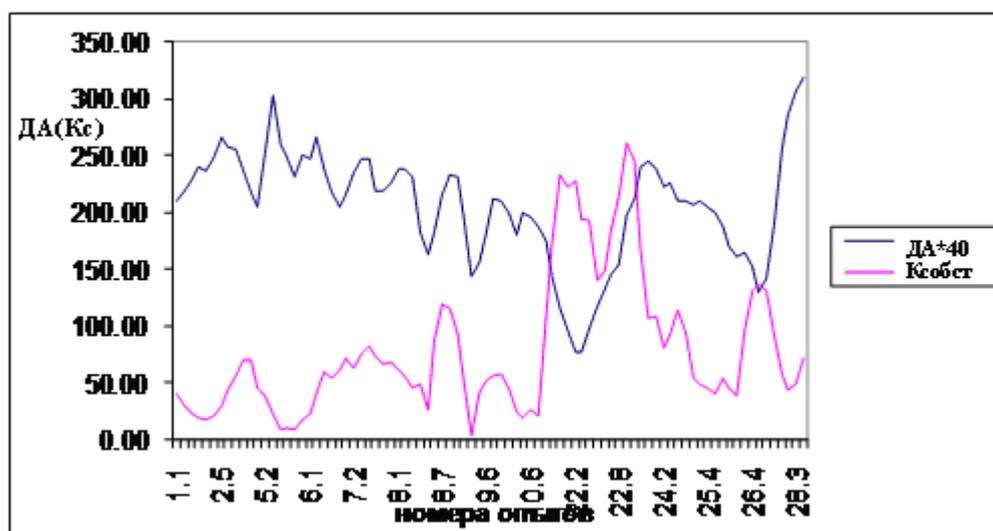


Рисунок 4.6 – Пример связи двигательной активности карпов с размахом геомагнитных возмущений (номера опытов обозначены в следующем порядке: *до точки* – номер эксперимента, *после точки* – номер кусочка ряда).

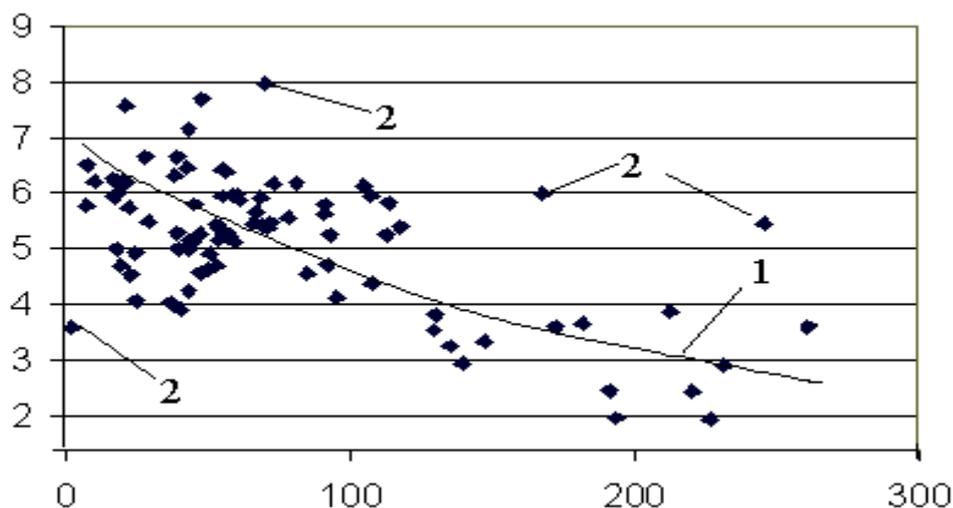


Рисунок 4.7 – Характер связи между двигательной активностью и геомагнитными возмущениями. Ось ординат – активность в ед. ДА, ось абсцисс – размах геомагнитных вариаций в нТл. Обозначения: 1 - аппроксимирующая кривая, 2 – точки выбросов, проверенные по метрологическому критерию "грубых промахов".

Зависимость на рисунке 4.7, кроме выявленной нелинейности связи ДА с геомагнитной возмущенностью показывает отсутствие каких-либо однозначных энергетических (амплитудных) «окон», как это предполагалось в работе [46]. Спад значений ДА в области 120-130 нТл, видимо, связан только с ограниченным количеством данных.

Тем не менее, однозначное установление наличия либо отсутствия амплитудных «окон» представляется очень важным, поскольку при их наличии следует предполагать некоторый квазирезонансный физический механизм восприятия электромагнитных возмущений, который рассматривается, например, в работе [53].

Влияние геомагнитных возмущений на сомиков (*Corydoras aeneus*) существенно отличается от влияния на карпов.

Наибольший коэффициент корреляции у сомовых рыб равен 0.87. В этом случае активность сомиков, в отличие от карпов, повышается с увеличением магнитной индукции, то есть рыбы становятся более беспокойными в период перехода МПЗ от спокойного состояния к возмущенному.

При этом предчувствия ни у карпов, ни у сомовиков выявить не удалось, однако реакция данных рыб на геомагнитные возмущения однозначна. На рисунках 4.8 и 4.9 показаны графики зависимости ДА от размаха вариации индукции, которые полностью подтверждают все выводы, сделанные ранее. Рассматривая полученные коэффициенты корреляции, следует также учитывать, что эти значения были получены для довольно коротких рядов, соответственно сами значения могут быть несколько завышены.

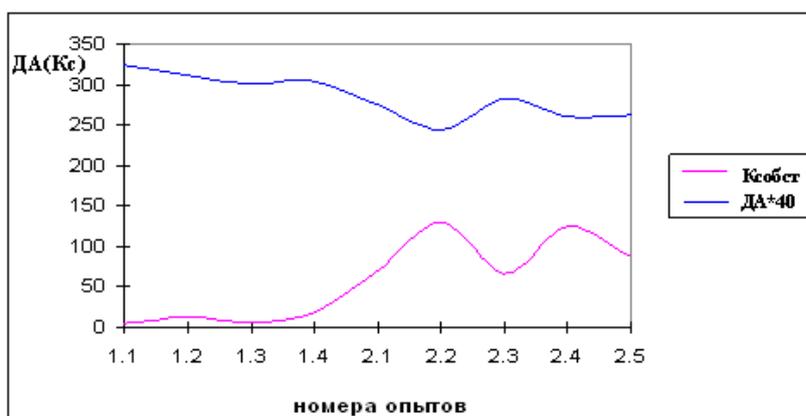


Рисунок 4.8 – Связь двигательной активности карпов с размахом вариаций индукции (номера опытов обозначены в следующем порядке: *до точки* – номер эксперимента, *после точки* – номер кусочка ряда).

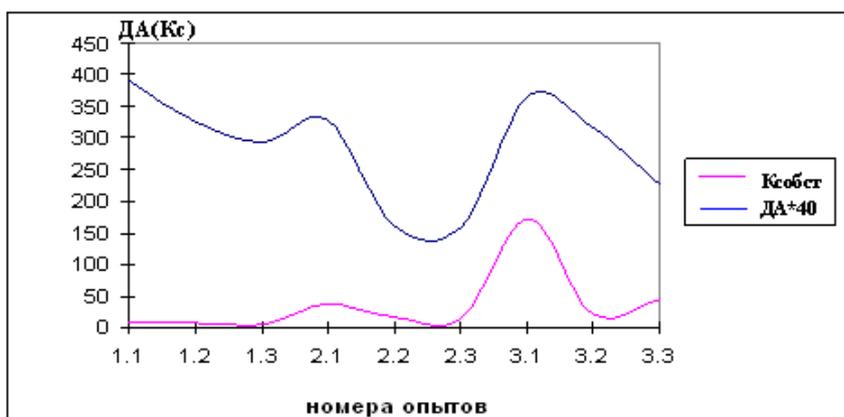


Рисунок 4.9 – Связь двигательной активности сомовиков с размахом вариаций индукции (номера опытов обозначены в следующем порядке: *до точки* – номер эксперимента, *после точки* – номер кусочка ряда).

На рисунках 4.6, 4.8 и 4.9 использованы значения индексов  $K_{\text{собств.}}$ . Это полный аналог общепринятого индекса  $K$  (рассчитывается по изменениям индукции за 3 часа по универсальному времени). Его отличие только в том, что расчет выполнялся не по изменениям индукции МПЗ, а за конкретные 3 часа эксперимента.

### 4.1.3 Оценка связи короткопериодной ритмики активности с геомагнитными бурями

При спектральном анализе отфильтрованных рядов двигательной активности и магнитной индукции были получены следующие результаты, которые представлены на рисунках 4.10 – 4.13.



Рисунок 4.10 – Спектральная плотность двигательной активности карпов (05.09.08).

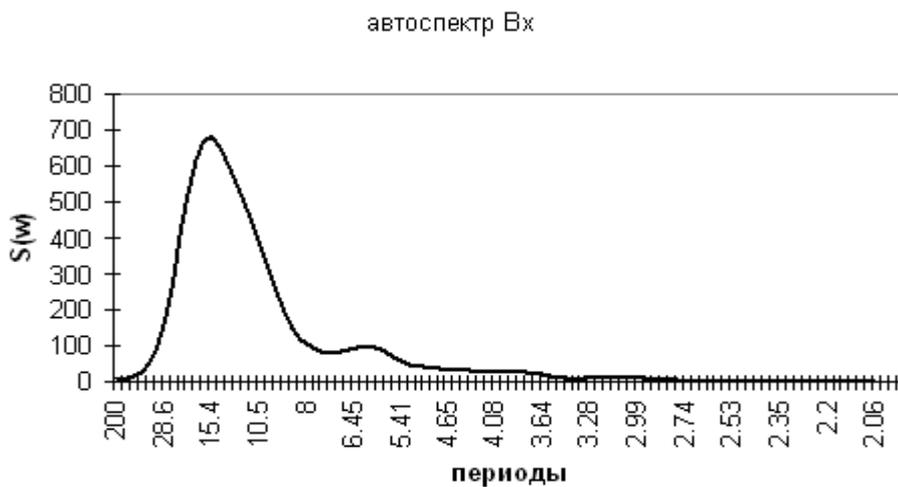


Рисунок 4.11 – Спектральная плотность вариаций магнитной индукции (05.09.08).



Рисунок 4.12 – Кросс-спектр (05.09.08).

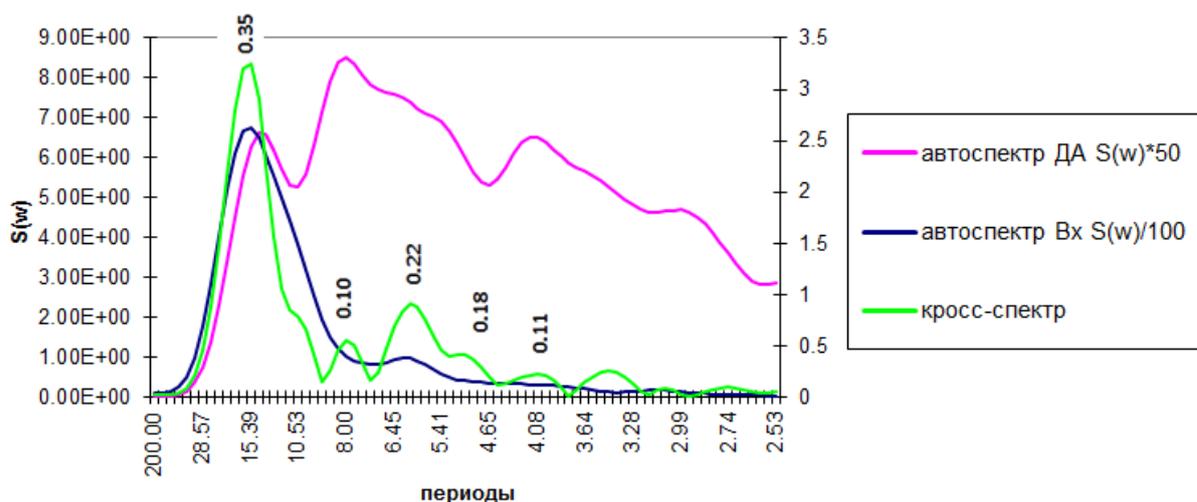


Рисунок 4.13 – Результаты спектрального анализа (05.09.08). Правая шкала соответствует кросс-спектру. Точки на графике – значения функции когерентности.

По данным рисункам видно, что выделяются группы периодов около 14-16 минут, 8, 6-5 и 3-4 минут, а по данным других опытов еще и период около 20-30 минут. Характер спектров демонстрирует, что некоторые периоды двигательной активности формируются внешними факторами, в приведенных данных – геомагнитными возмущениями, в частности, период 14-16 мин, при этом значение функции когерентности очень высокое – до 0,8. Другие периоды, видимо, являются некоторыми собственными и формируются физиологическими причинами.

Таким образом, рыбы не функционируют только «в своем собственном мирке», а связаны с такими внешними по отношению к этому «мирку» факторами, как электромагнитные возмущения.

При этом фрактальный анализ подтверждает высокую детерминированность этой ритмики (коэффициент Херста практически за весь эксперимент выше 0,5) как для периодов 14-16 мин, так и для более коротких периодов, определяемых внутренними потребностями животных (рисунок 4.14).

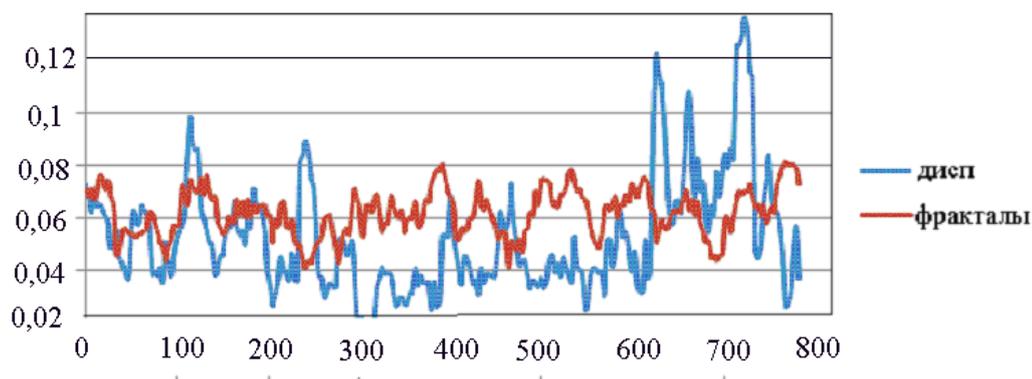


Рисунок 4.14 – Дисперсия ДА и вариации коэффициента Херста за период длительного эксперимента с карповыми рыбами 05.09.08. По оси абсцисс – время в мин., по оси ординат – текущая дисперсия ДА (усл.ед.) и согласованные значения коэффициента Херста, деленные на 10.

#### 4.1.4 Оценки связи двигательной активности с приближением циклонов и фронтальных разделов

Для оценок связи использовался математический аппарат фрактального анализа, в предположении, что рыбы воспринимают ПеМП, возбуждаемые гидрометеорологическими процессами, и начинают более быстро и хаотично двигаться. Соответственно, коэффициент Херста, рассчитываемый по ДА, может падать до значений ниже 0,5 («спад в хаос»).

В процессе работы был проведен фрактальный анализ в целях выявления степени детерминированности двигательной активности рыб. В ходе экспериментов были получены ряды показателя Херста с шагом равным 3. Наибольший интерес представляли спады в "хаос", когда H-показатель становился меньше 0.5.

В результате для каждого эксперимента фиксировались моменты времени подобных спадов в двигательной активности у рыб, а затем оценивалась геомагнитная и метеорологическая обстановка в это время.

Ранее было указано, что в целом геомагнитную ситуацию в период экспериментов можно характеризовать как спокойную, поэтому основное внимание уделялось изучению приземных карт погоды с нанесенными на них положениями центров циклонов и фронтов. В ходе подробного анализа учитывался тот факт, что прохождение циклона или фронта существенно меняет естественное электромагнитное поле, на изменения которого и реагируют гидробионты. Также с помощью такого рода анализа можно рассматривать вопрос о возможном предчувствии опасных гидрометеорологических явлений у рыб.

Для этого определялись значения дисперсии двигательной активности с последующей статистической обработкой совместно с рядами данных показателя Херста, а именно был определен коэффициент корреляции между двумя выборками с последующим построением необходимых графических зависимостей. В целом, можно сделать вывод о наличии некоторой связи между двумя характеристиками, но, учитывая, что дисперсия и показатель Херста принципиально различаются по своим параметрам, полученная зависимость не явно проявляется на графиках.

Анализ приземных карт погоды позволил определить время прохождения циклона или фронта и соотнести его с поведением рыб на основании двигательной активности. В целом можно сделать вывод о достаточно неплохой реакции рыб на систему малоподвижных фронтов, в отдельных случаях возможно даже сделать предположение о предчувствии рыбами прохождения фронта за 3-6 часов. На рисунках 4.15 – 4.18 изображены синоптические карты для одного из опытов с карпами, который длился по московскому времени с 01:23 до 9:00 31.08.08. На рисунке 4.19 показаны вариации показателя Херста во время этого эксперимента.

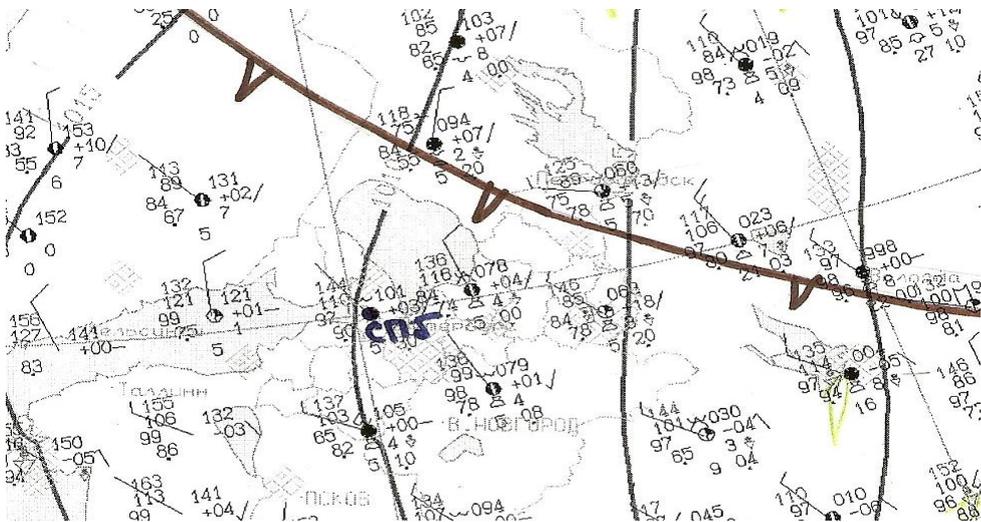


Рисунок 4.15 – Синоптическая карта за 18(22):00 30.08.08.

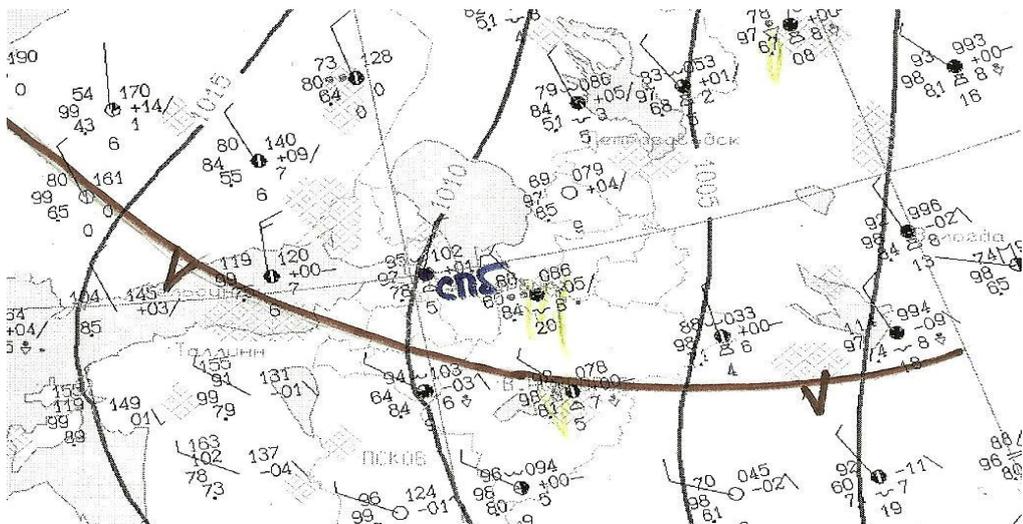


Рисунок 4.16 – Синоптическая карта за 21(01):00 30.08.08.

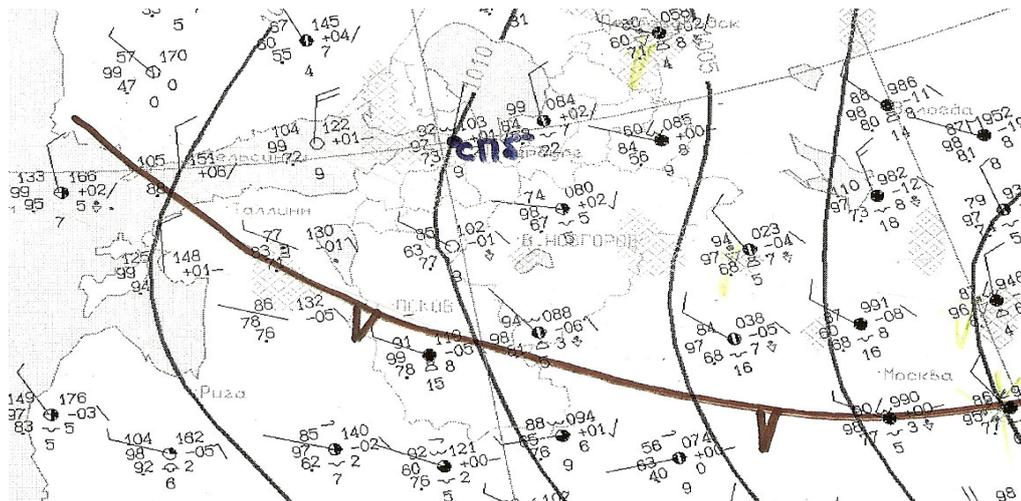


Рисунок 4.17 – Синоптическая карта за 00(04):00 31.08.08.



Рисунок 4.18– Синоптическая карта за 03(07):00 31.08.08.

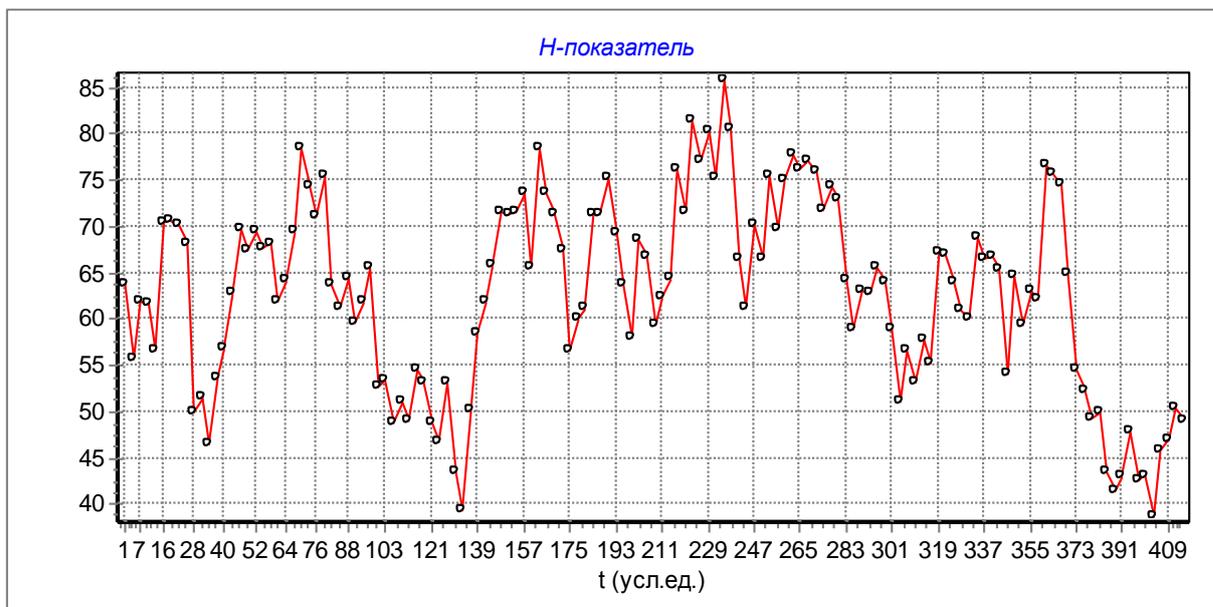


Рисунок 4.19 – Вариации показателя Херста во время опыта 31.08.08 (ось ординат – значения показателя Херста, умноженные на 100; ось абсцисс – время от начала эксперимента в минутах).

Из приведенного графика видно, что имеют место два значительных спада (121-133 мин и 385-409 мин). Если сопоставить время спада "в хаос" у рыб со временем прохождения холодного фронта, то можно сделать вывод о том, что первый спад является результатом возможного предчувствия, а второй – возможной реакцией на прохождение фронта.

Интересная метеорологическая обстановка наблюдалась во время суточного опыта. Ниже приведены карты (рисунки 4.20–4.21), которые соответствуют промежутку времени первого сброса в поведении рыб (рисунок 4.22) длительностью от 88 до 103 минут от начала эксперимента. Следовательно, можно сделать вывод о том, что рыбы могли предчувствовать приближение фронта окклюзии.

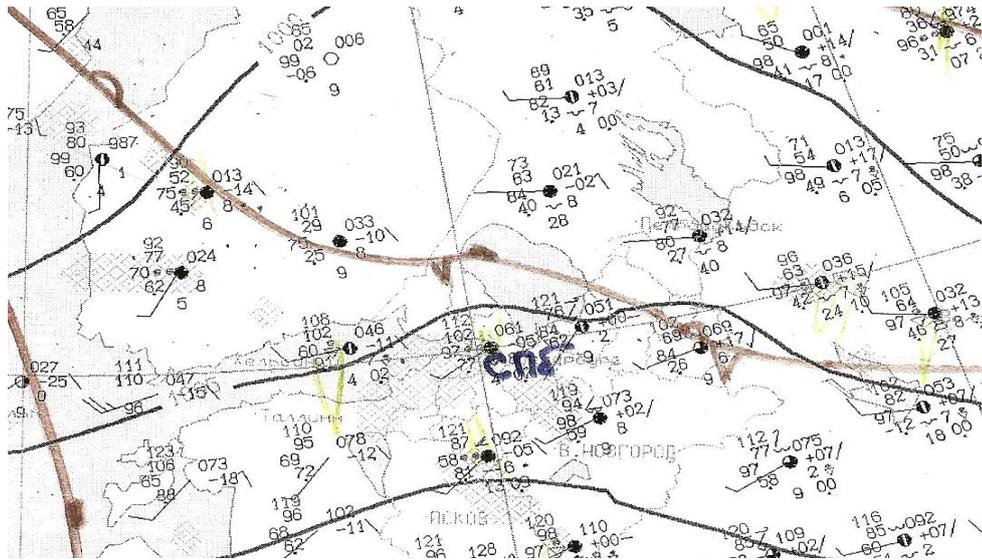


Рисунок 4.20 – Синоптическая карта за 18(22):00 13.10.08.

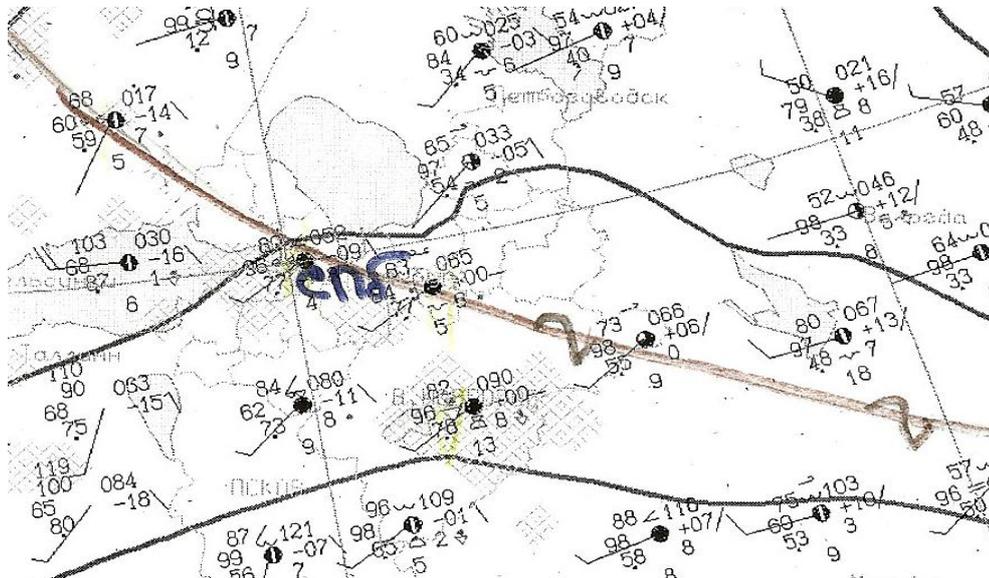


Рисунок 4.21 – Синоптическая карта за 21(01):00 13.10.08.

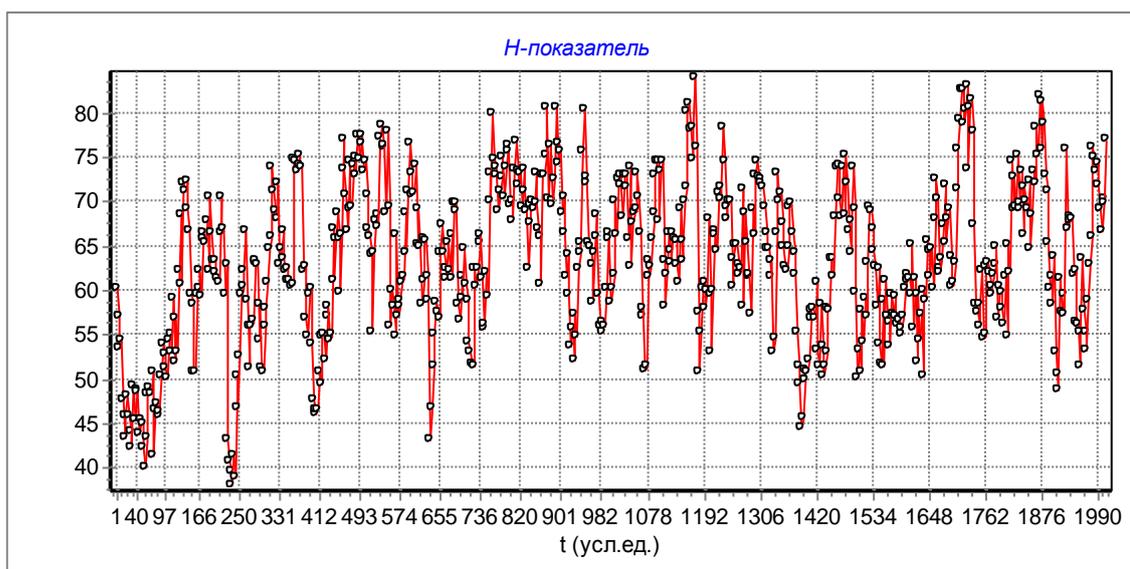


Рисунок 4.22 – Вариации показателя Херста во время суточного опыта с 23:50 13.10.08 по 10:00 15.10.08.

Однако не во всех случаях значительные спады показателя Херста удалось связать с погодными условиями. Так, например, за 11.09.08 и 12.09.08 наблюдались два значительных сброса в поведении рыб, но погодные условия были хорошие (стоял антициклон), также никаких значительных геомагнитных возмущений не было отмечено за эти периоды. Единственным возможным объяснением подобных спадов показателя Херста может быть наличие некоторых случайных неучтенных факторов, влияние которых не изучалось в рамках проведенной работы.

## 4.2 Сомовые рыбы

## 4.2.1 Реакция сомовых рыб на гидрометеорологические процессы

Многие опасные гидрометеорологические процессы являются биологически важными для рыб, так например, ожидание циклона и связанного с ним шторма. В проведенных экспериментах особое внимание уделялось не только присутствию циклона, но и прохождению фронта. Экспериментальные исследования [69] внутренней структуры ЭМП, генерируемых циклоном, позволяют сделать выводы о том, что основной энергонесущий спектр сосредоточен в области частот от 6,5 до 11 Гц с преобладанием колебаний в районе 7-7,5 Гц.

Кроме того, исследование огибающей несущего сигнала [70] позволили установить, что при приближении циклона, начиная примерно с расстояния 1000 км, наблюдается возрастание уровня сигнала, которое может рассматриваться как монотонное и достигать напряженности порядка 15 нТл. На этом фоне могут наблюдаться модулирующие вариации с характерными периодами в диапазоне 5-20 минут (Рисунок 4.23).

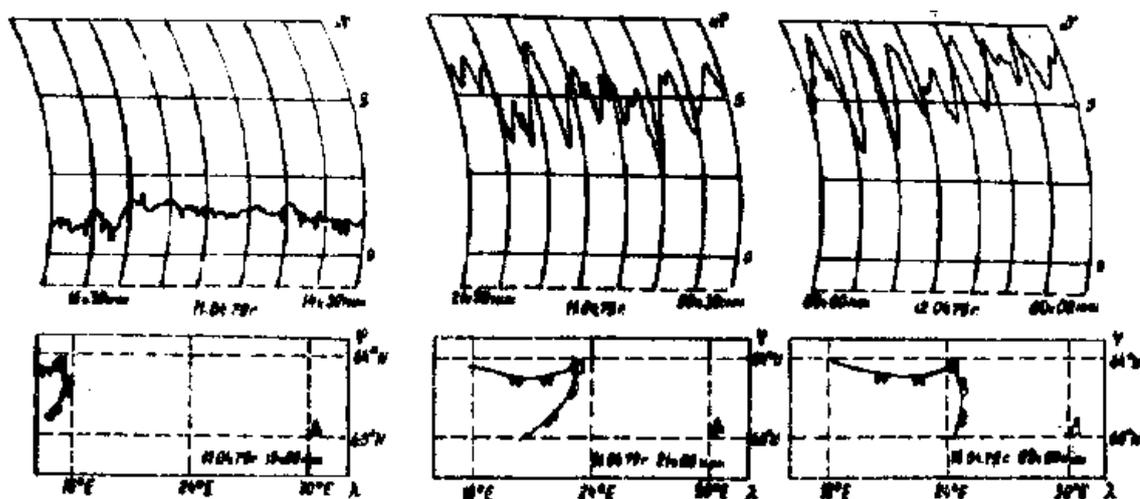


Рисунок 4.23 – Пример вариаций ЕЭМП при приближении циклона к месту регистрации (из работы [65]).

Спектральный анализ данных для одиночных циклонов [71] позволил установить, что мощность модулирующих вариаций, связанных с ВГВ, обратно пропорциональна расстоянию от пункта наблюдений до центра приближающегося циклона, при этом выделяются два энергонесущих периода этих вариаций – 5,7 мин и 12 мин (Рисунок 4.24).

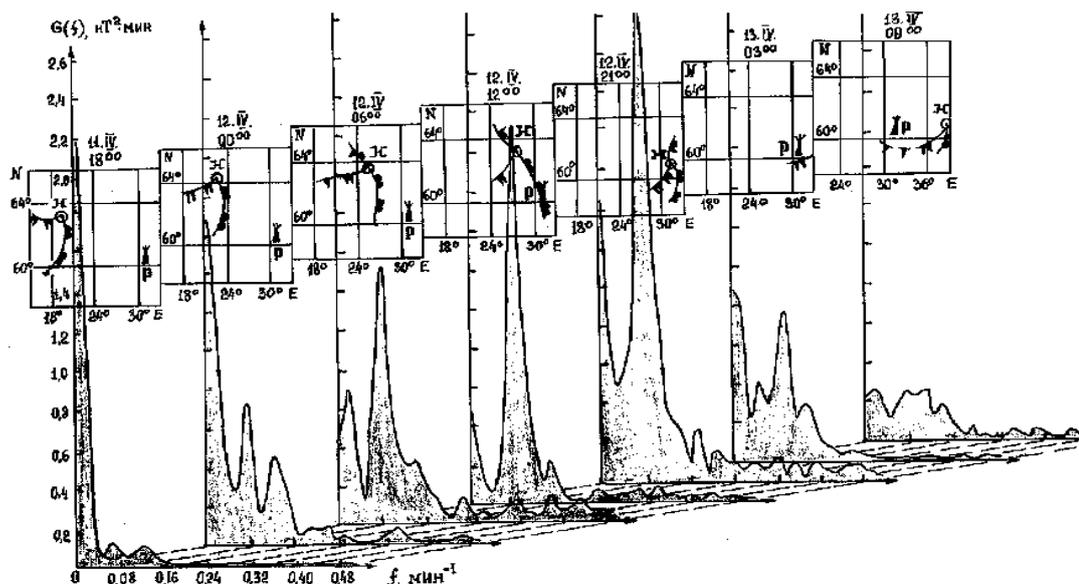


Рисунок 4.24– Спектры мощности сигнала ЕЭМП при различных расстояниях от циклона (из работы [1]).

Для проверки предположения о биологической важности гидрометеорологических процессов в ходе исследований реакций гидробионтов на предъявление ЭМ-поля экранирование лаборатории не осуществлялось, таким образом, приходилось учитывать внешние поля – контролировать геомагнитную и гидрометеорологическую обстановку, что обеспечило дополнительную информацию по интересующей теме. Затем проводился отдельный анализ данных, полученных при возмущенных условиях.

Эксперимент на предъявление переменного магнитного поля, проведенный 17.04.2012 при подаче частоты 7 Гц, показал подавление двигательной активности, как по нормированным данным активности, так и по дисперсии поведения сомовых рыб (Рисунки 4.25 и 4.26). При рассмотрении метеорологической обстановки в

момент проведения опыта было установлено, что такое снижение активности рыб соответствовало прохождению циклона, поэтому 24.04.2012 был проведен повторный эксперимент на частоте 7 Гц при условии отсутствия циклона. По результатам полученных данных видно, что при повторном эксперименте в момент опыта на той же частоте показатели активности сомов оказались выше данных опыта при циклоне (Рисунок 4.27). Таким образом, на основании накопленных сведений были сделаны выводы о том, что прохождение циклона, в общем, влияет на повышение двигательной активности сомовых. Но при этом магнитное поле на частоте 7 Гц вызывает четкую положительную реакцию у сомовых рыб. Приземные карты представлены на рисунках 4.28; 4.29.



Рисунок 4.25 – Изменение средней двигательной активности и дисперсии сомов при частоте 7 Гц (циклон) (опыт: 17:10 – 18:10).

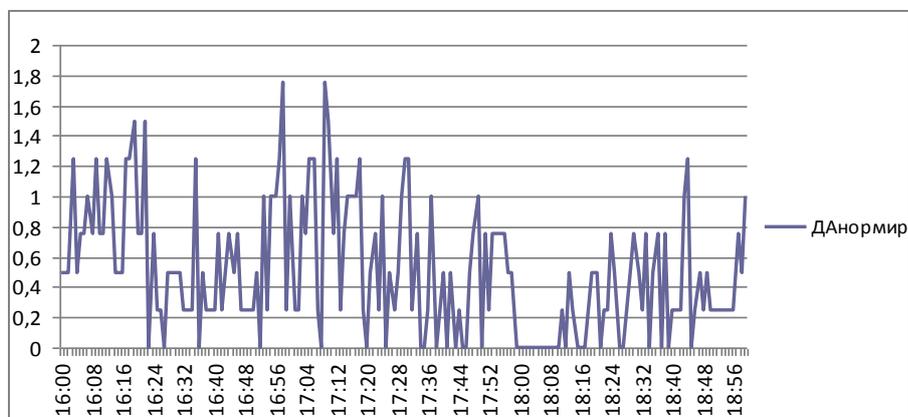


Рисунок 4.26 – Изменение нормированных данных двигательной активности при циклоне.

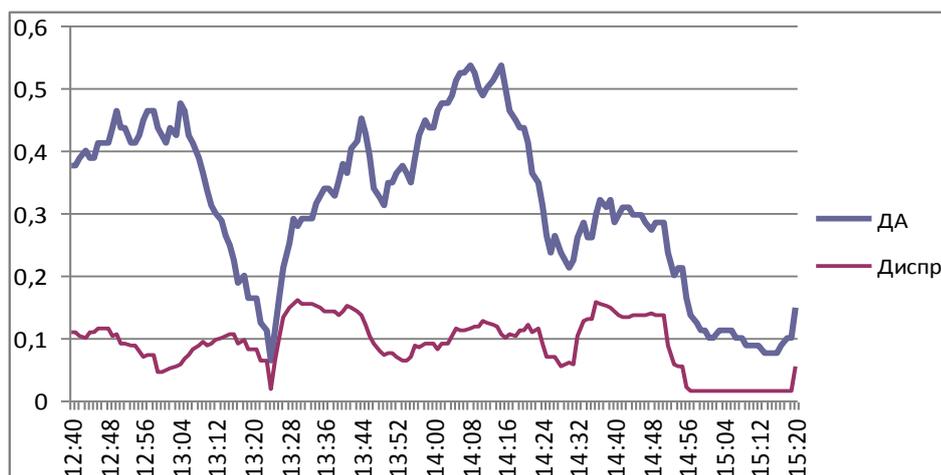


Рисунок 4.27 – Изменение средней двигательной активности и дисперсии сомов при частоте 7 Гц (опыт: 13:40 – 14:40).

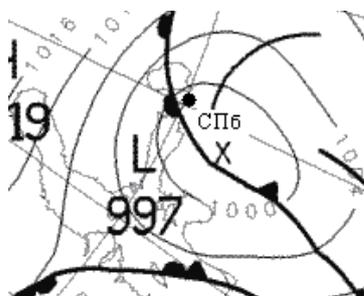


Рисунок 4.28 – Фрагмент приземной карты за 17.04.2012 (циклон).

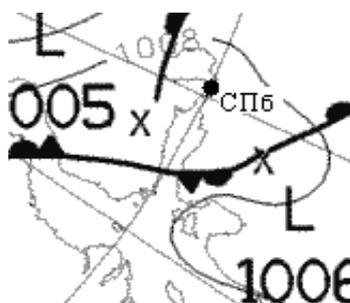


Рисунок 4.29 – Фрагмент приземной карты за 24.04.2012.

Приведенные результаты подтверждаются данными из работы [47]. В этой работе был проведен суточный эксперимент по регистрации ДА сомов *Corydoras aeneus*. В качестве индикатора приближения и прохождения циклона использовалась дисперсия ДА и изменчивость показателя Херста (Рисунок 4.30). Особенности этих характеристик выявлялись на фоне среднесуточного хода ДА



Рисунок 4.30 – Характеристики поведения сомиков при прохождении циклона с системой атмосферных фронтов. 1 – дисперсия поведения  $D$ , 2 – показатель Херста ( $\times 100$ ), 3 – осредненный суточный ход активности.

Наблюдения проводились в период прохождения циклона с фронтальным разделом (Рисунок 4.31). Данные о синоптической обстановке брались с общедоступного немецкого сайта.

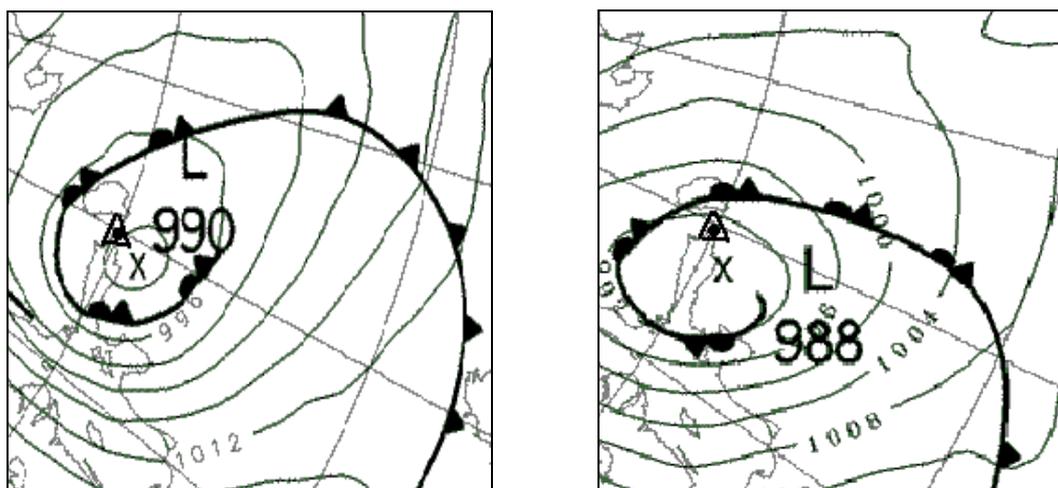


Рисунок 4.31 – Синоптическая обстановка при наблюдении ДА сомиков *Corydoras aeneus*. Слева – исходное положение циклона в начале наблюдений, справа положение циклона через 12 часов. Треугольник с точкой – пункт наблюдений.

Анализ этих данных однозначно свидетельствует о наличии реакций сомиков на прохождение циклона и фронтальных разделов. Однако выбор дисперсии в качестве индикатора представляется не всегда надежным. Причина в том, что дисперсия здесь связана не только с «размахом» вариаций ДА, но и с интенсивностью ДА, а уменьшение интенсивности при том же «размахе» дает возрастание дисперсии.

Кроме того, из-за возведения в квадрат здесь теряется информация о знаке изменчивости ДА.

Не менее интересной, а возможно и более корректной является не дисперсия, а изменчивость интенсивности ДА (см. ниже п. 4.2.2). Воспользовавшись исходными данными о ДА в течение выполненного в работе [47] суточного эксперимента и проанализировав полученный ряд, разбивая его на стационарные кусочки, удалось получить следующее. В ходе проведенного эксперимента 20.04.07 наблюдалось понижение величины среднего значения (Рисунок 4.32), что свидетельствует о возрастании дисперсии, отмеченного на рисунке 4.30.

Действительно, осредненные данные показывают, что возрастание интенсивности ДА, так же, как и по дисперсии, привязано к синоптической обстановке. То есть в распределении выделяются участки примерно 150-260 мин (1-й участок), 800-950 мин (2-й участок) и 1250-1450 (3-й участок). Причем, следует отметить, что 3-й участок значительно шире, чем выделяемый по дисперсии.

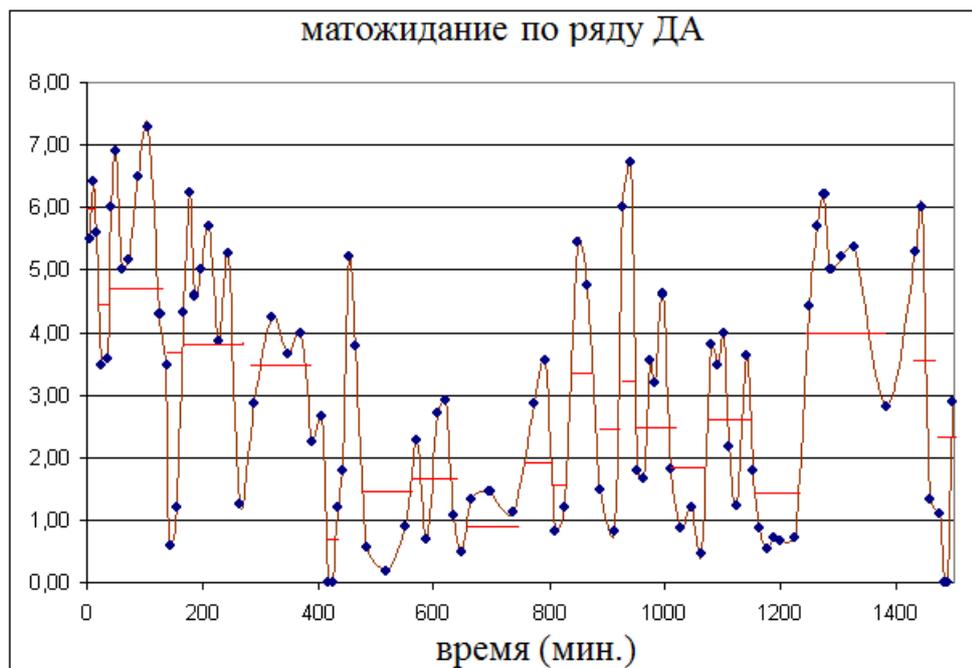


Рисунок 4.32 – Величина матожидания по ряду суточного эксперимента с сомовыми рыбами (красными чертами выделены квазистационарные участки ряда).

Все это означает, что средние значения интенсивности ДА в не меньшей мере, а, может, даже лучше отражают влияние гидрометеорологических условий на активность рыб.

Однако при этом никак нельзя произвольно осреднять данные. Необходимо выделять квазистационарные участки (фрагменты), и только для них оценивать средние значения. Этот прием был использован при обработке данных дальнейших экспериментов. Квазистационарность для выделяемых фрагментов оценивалась только по среднему, т.е. как стационарность «в узком смысле».

#### 4.2.2 Поиск механизмов восприятия сомовыми рыбами гидрометеорологических процессов. Чувствительность к переменным электрическим полям

В ходе проведения серии экспериментов в лабораторном бассейне были получены ряды ДА при различных частотах воздействующего на рыб электрического поля. Данные были нормированы путем деления вычисленной ДА на общее количество рыб. Напряженность электрического поля на установке

(рисунок 3.1) задавалась 2,7 мВ/см. Поле формировалось как однородное во всем бассейне. Адаптация рыб происходила за 20-25 мин.

Далее для каждой квазистационарной части ряда были рассчитано средние значения ДА, а также дисперсии. Воздействие на сомовых рыб электрическим полем частот 0,1÷10 Гц позволило выявить следующее. Реакция сомовых рыб на различные частоты оказалась различной. В частотной характеристике выявлены характерные «окна» повышенной чувствительности (Рисунок 4.33). Данные по интенсивности реакции рыбы приведены в таблице 4.2.

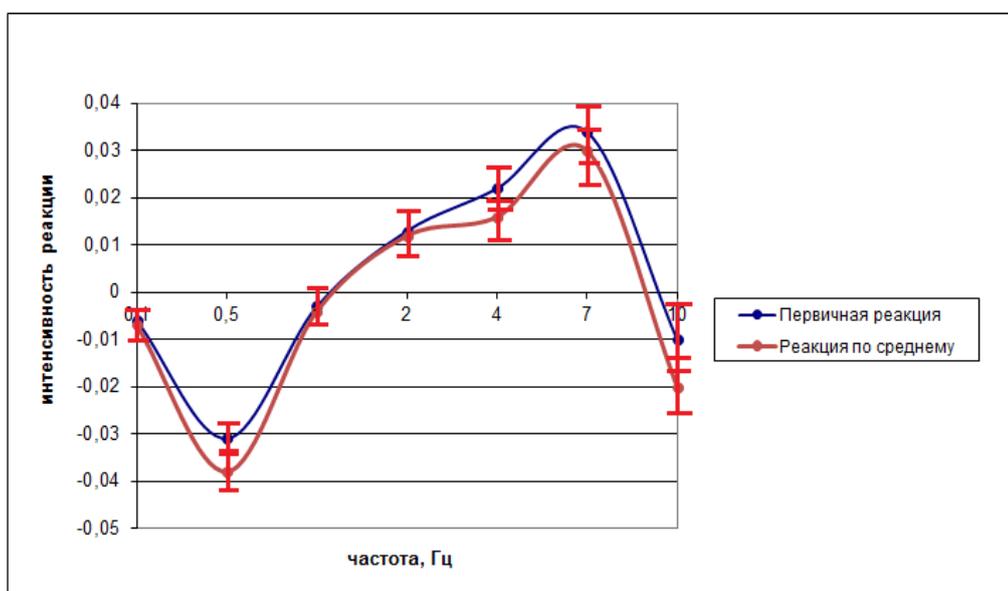


Рисунок 4.33 – Интенсивность реакции сомовых рыб (доверительные интервалы выделены красным и рассчитаны для доверительной вероятности 0,95).

Таблица 4.2 – Интенсивность реакции

<b>Частота Гц</b>	<b>Интенсивность реакции (первичная)</b>	<b>Интенсивность реакции (по среднему)</b>
<b>0,1</b>	<b>-0,006±0,004</b>	<b>-0,007±0,004</b>
<b>0,5</b>	<b>-0,031±0,005</b>	<b>-0,038±0,005</b>
<b>1</b>	<b>-0,003±0,001</b>	<b>-0,004±0,001</b>
<b>2</b>	<b>0,013±0,005</b>	<b>0,012±0,005</b>
<b>4</b>	<b>0,022±0,005</b>	<b>0,016±0,005</b>
<b>7</b>	<b>0,034±0,005</b>	<b>0,03±0,005</b>
<b>10</b>	<b>-0,01±0,005</b>	<b>-0,02±0,005</b>

Частотные «окна» повышенной чувствительности на рисунке 4.33 выделяются в диапазоне примерно 0,2 –1 Гц и 2–8 Гц с экстремумами 0,5 Гц и 7 Гц. Для первого «окна» характерна реакция подавления активности, для второго, наоборот – реакция возбуждения. Первое «окно», видимо, следует связывать с физиологическими особенностями, а второе – с задачами получения информации о среде обитания.

Следует отметить, что частотная характеристика электрочувствительности близка к выявленной по отношению к японским карликовым сомикам (рисунок 1.7). Однако, при совпадении «окон» с экстремумом 7 Гц, видны также существенные различия в «физиологическом окне». На рисунке 1.7 оно столь отчетливо не выделяется. Возможно, это связано с тем, что исследовались разные виды сомовых.

При обработке данных выделялись: *первичная реакция* (разность между значением интенсивности ДА после начала реакции и фоновой интенсивностью), и *интенсивность по среднему* (разность между средним значением интенсивности ДА за период воздействия и фоновым значением). Пример изображения ряда ДА, нормированного на число рыб в аквариуме, представлен на рисунке 4.34. Дисперсия ряда ДА для этого же опыта – на рисунке 4.35.

Наблюдается некоторая адаптация реакции на действие воздействующего фактора во втором выделенном «окне» и некоторое усиление реакции в первом «окне». Видимо, эти различия имеют объяснение, но в данной работе это подробно не изучалось.



Рисунок 4.34 – Изменение нормированной двигательной активности при частоте 4 Гц (опыт: 18:16 – 19:16).

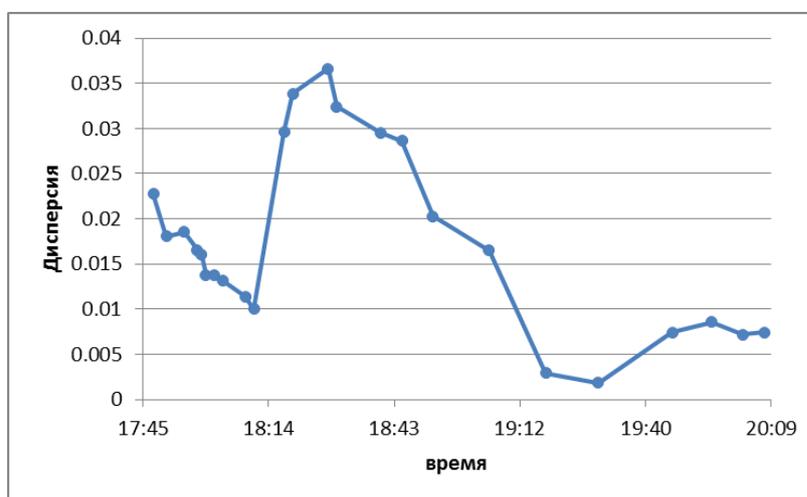


Рисунок 4.35 – Изменение дисперсии ряда ДА на частоте 4 Гц.

### 4.2.3 Чувствительность сомовых рыб к переменным магнитным полям

Эксперименты проводились на установке с соленоидом возбуждения (Рисунки 3.2 и 3.3). Диаметр соленоида существенно превышал поперечный размер бассейна, поэтому создаваемые переменные магнитные поля получались практически однородными. Индукция задавалась в 100 нТл, что контролировалось с помощью измерительных приборов.

Результаты обрабатывались по аналогии с обработкой данных экспериментов по воздействию переменного электрического поля. При воздействии магнитного поля характер опосредованного восприятия на различных частотах оказывается различным. Поля в диапазоне 2÷4 Гц оставляют животных практически безразличными к воздействию. В то же время частоты 1 Гц и 7 Гц привлекают рыб (Рисунок 4.36). Интенсивность реакции рыб приведена в таблице 4.3. Изменение нормированной ДА на частоте 1 Гц и изменение дисперсии ряда ДА на частотах 1 и 7 Гц приведены на рисунках 4.37-4.39.

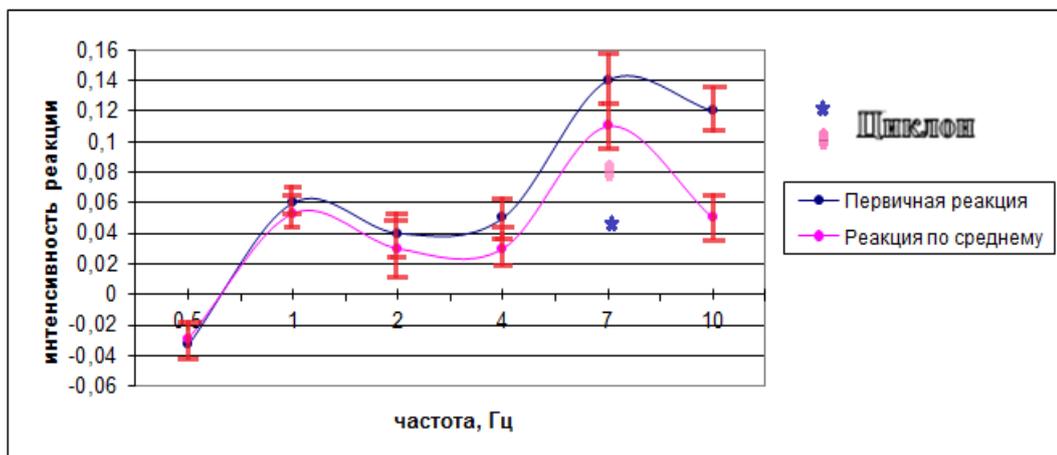


Рисунок 4.36 – Интенсивность реакции.

Таблица 4.3 – Интенсивность реакции

Частота, Гц	Интенсивность реакции (первичная)	Интенсивность реакции (по среднему)
0,5	$-0,033 \pm 0,007$	$-0,029 \pm 0,009$
1	$0,06 \pm 0,01$	$0,053 \pm 0,009$
2	$0,04 \pm 0,008$	$0,03 \pm 0,01$
4	$0,05 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$
7	$0,14 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,02$
7 (циклон)	0,05	0,08
10	$0,12 \pm 0,02$	$0,05 \pm 0,019$

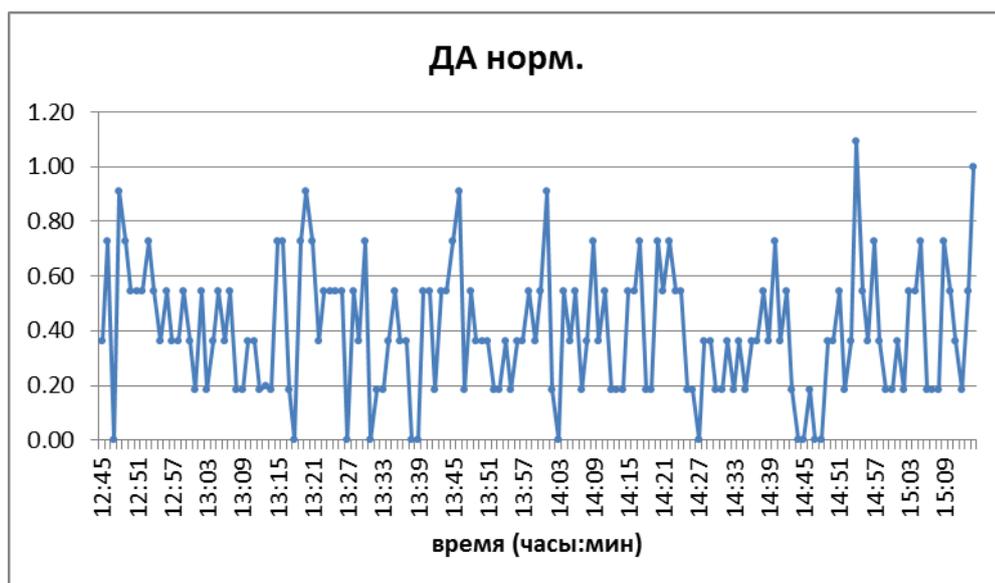


Рисунок 4.37 – Изменение нормированной двигательной активности при частоте 1 Гц (опыт: 13:15 – 14:15).

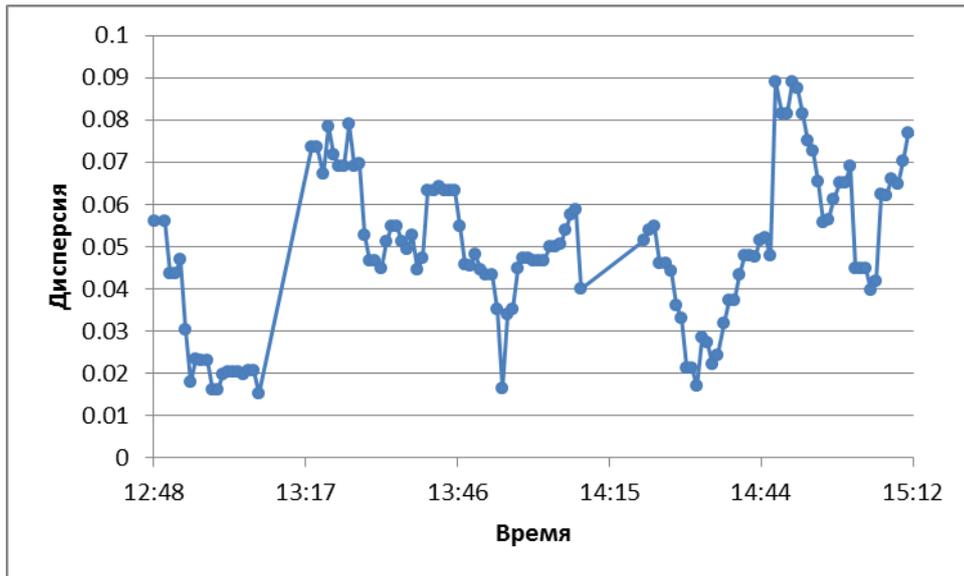


Рисунок 4.38 – Изменение дисперсии ряда ДА на частоте 1 Гц.

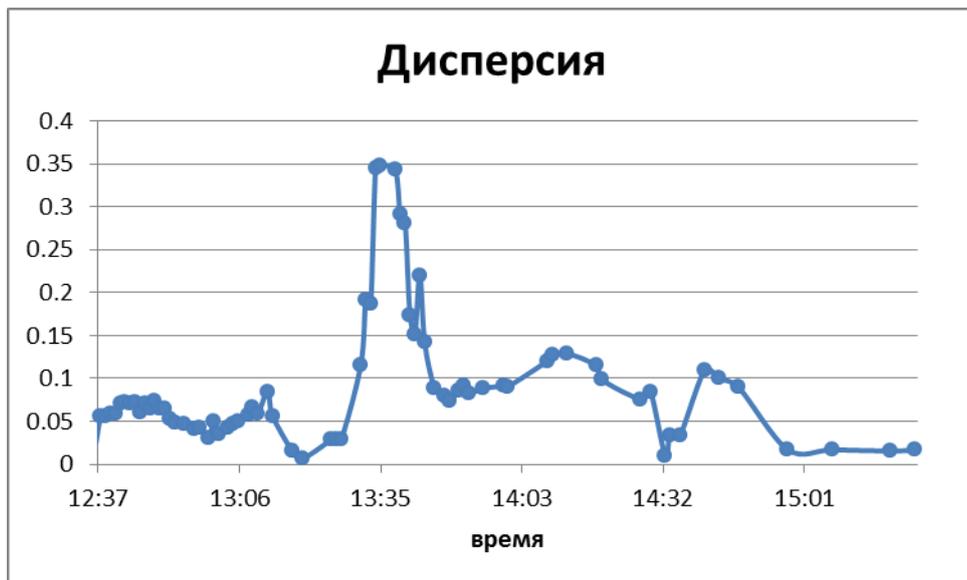


Рисунок 4.39 – Изменение дисперсии ряда ДА на частоте 7 Гц (опыт: 13:30 – 14:30).

## 4.2 Выводы

Из полученных данных следует:

- реакция на приближение и прохождение опасных гидрометеорологических процессов выявляется в статистически значимой изменчивости характеристик двигательной активности (ДА) сомиков; в качестве индикаторов изменчивости могут выступать:

непосредственно интенсивность ДА, дисперсия ДА и фрактальная размерность ДА (через коэффициент Херста);

- реакция сомиков формируется под воздействием электромагнитных полей КНЧ-диапазона, возбуждаемых в атмосфере в области циклонов и фронтальных разделов и распространяющихся вперед по направлению их движения;
- реакция ДА сомиков на различные частоты электромагнитных полей, формируемых гидрометеорологическими процессами, оказывается разнонаправленной, при этом даже смещение частоты на 1 Гц имеет большое значение и может менять знак и величину реакции;
- кроме самой реакции большое значение имеет время задержки этой реакции, которое неравномерно связано с воздействующими частотами. Времена задержки реакции (латентные периоды) более подробно рассмотрены в 4.4.

### 4.3 Камчатские крабы

#### 4.3.1 Влияние магнитных бурь на двигательную активность камчатских крабов.

##### Эффекты предчувствия

###### Фоновые характеристики активности крабов.

Беспозвоночные животные не имеют электрорецепторов, хотя в процессе эволюции они подвергались и продолжают подвергаться воздействию вариаций МПЗ. Открытие биогенного магнетита у многих животных явилось толчком к тому, чтобы по новому взглянуть на проблему магниторецепции [72]. У морских млекопитающих, рыб, черепах, птиц, насекомых, крабов магнитные частицы окружены нервной тканью, подтверждая взаимодействие между частицами и мозгом. Установление способности определенных сенсорных структур животных к восприятию магнитного поля представляет значительный интерес для ученых, поскольку это помогло бы лучше изучить миграционное поведение и ответить на многие вопросы, связанные с ориентацией в пространстве. В настоящее время приходится опираться только на экспериментальные данные.

При сезонных миграциях крабы сталкиваются с резкими перепадами температуры морской воды. Исследования по воздействию температуры воды на жизнедеятельность камчатского краба, внедренного в воды Баренцевого моря, практически отсутствуют, тогда, как эти данные помогли бы расширить представления о механизмах адаптации беспозвоночных в морях высоких широт. Необходимость экспериментов подтверждается тем фактом, что хищническая эксплуатация краба на Дальнем Востоке привела к сокращению его запасов в этом регионе, что подтолкнуло ученых к идее бассейнового воспроизводства.

Проводилась работа по выявлению оптимальных температурных режимов для различных стадий онтогенеза камчатского краба [73], что может быть полезно для практики их культивирования в Арктическом регионе.

Опыты были выполнены на 19 экземплярах крабов в возрасте от 4-5 лет. В качестве критерия жизнедеятельности животных использовались двигательная и

сердечная активность. Регистрацию двигательной активности краба осуществляли с помощью тензодатчика, который через мостовую схему подключали к чернилопишущему прибору Н-338 4П.

Данная работы была разделена на два этапа. На первом этапе при естественном освещении и постоянной температуре воды 5-6 °С изучалась суточная ритмика активности животных. В течение эксперимента с мая по октябрь 2007 года было получено достоверное снижение двигательной активности камчатского краба в ночной период жизнедеятельности. Наиболее отчетливо активность краба проявлялась в период наступления полярной ночи.

Было установлено, что частота сердечных сокращений у адаптированных крабов в спокойном состоянии в экспериментальном аквариуме оставалась неизменной, и составляла  $76 \pm 1$  ударов в минуту. При медленном, в течение двух часов, нагревании воды до 15 °С частота сердечных сокращений закономерно повышалась до  $123 \pm 2.6$  ударов в минуту (Рисунок 4.40). Из этого можно сделать вывод, что на каждый градус изменения температуры окружающей среды краб реагировал изменением частоты сердечных сокращений.

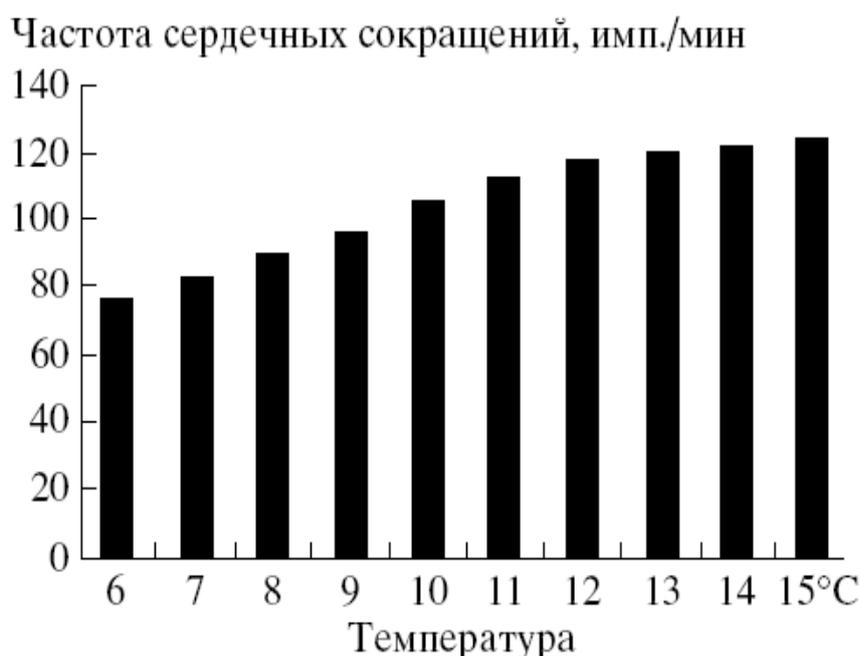


Рисунок 4.40 – Влияние температуры на частоту сердечных сокращений камчатского краба (из работы [73]).

В работе [73] выявлены реакции камчатского краба на резкое изменение температуры окружающей водной среды. Для этого в лабораторных условиях были поставлены две емкости, одна из которых содержала воду, нагретую до  $14^{\circ}\text{C}$ , а в другой емкости охлаждали воду до  $-2^{\circ}\text{C}$ , после чего крабов из одной емкости быстро пересаживали в другую емкость. На протяжении всего эксперимента регистрировали двигательную активность камчатского краба. Из результатов работы можно сделать вывод, что те крабы, которые находились в воде при  $-2^{\circ}\text{C}$  в течение одного часа, оставались неподвижными. После того, как крабы начинали двигаться, их помещали в емкость с теплой водой, где они приобретали высокую двигательную активность (Рисунок 4.41).

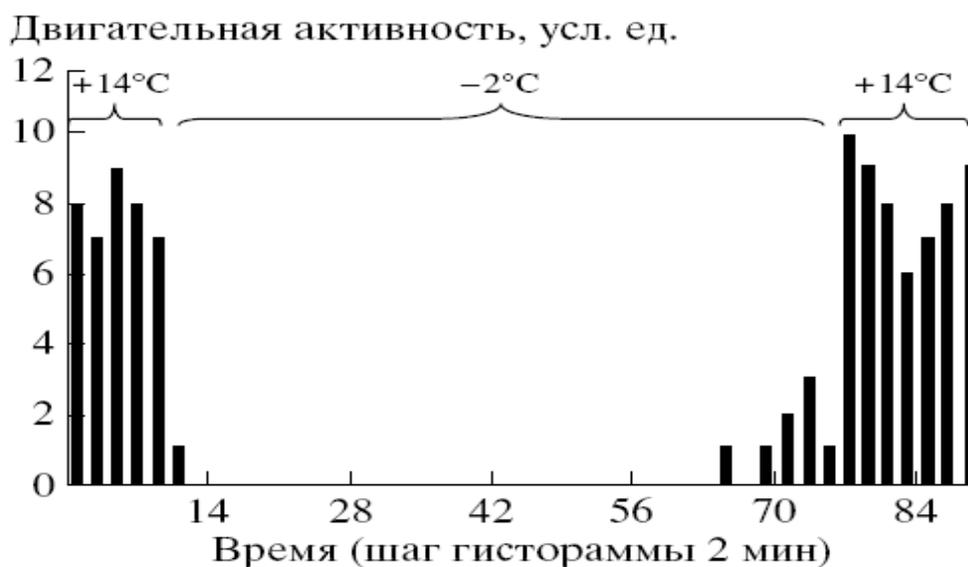


Рисунок 4.41 – Влияние резкого перепада температуры на двигательную активность краба (из работы [73]).

Таким образом, в данных опытах было установлено, что камчатский краб, который был переселен в воды Баренцева моря, выдерживает перепады температуры в  $16^{\circ}\text{C}$ . Это показывает, что в процессе длительной акклиматизации камчатского краба в Баренцевом море, данные животные выработали дополнительные адаптационные механизмы. Отсюда можно сделать вывод, что полученные результаты подтверждают, что у камчатского краба высокая

устойчивость к перепадам температуры, а также, что данный вид успешно может использоваться в марикультуре в условиях севера.

Интересные данные получены Бехтевой В.В. [74] по выявлению спектральных особенностей двигательной активности камчатского краба. Вместо ожидаемых периодов (суточный, полусуточный и др.) получились сильно сдвинутые периоды. При этом никакой связи с приливными процессами эти особенности не имели. Ожидаемый суточный период оказался равным примерно 16 часам (980 мин), полусуточный – примерно 10 часов (603 мин). Более короткие периоды были тоже значимы – 490, 436 и 373 мин. Уровень значимости выявленных спектральных пиков был не более 0,1. При этом расчет фрактальной размерности продемонстрировал высокую детерминированность этих периодичностей (коэффициент Херста составлял 0,55-0,9).

#### *Выявление реакций крабов на геофизические и гидрометеорологические процессы.*

Кроме описанных экспериментов на экспериментальной базе Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН проводились исследования по определению реакции краба на геомагнитные возмущения (магнитные бури). Подробно эксперименты описаны в работе [58].

Данные опыты также выполнялись при естественном освещении с камчатским крабом в возрасте 4-5 лет. В качестве критерия жизнедеятельности животных всё также использовалась их двигательная активность, поскольку все сенсорные системы краба замыкаются на мышцах. Двигательная активность краба исследовалась с помощью специальной установки, которая содержала кинематический блок, связанный с крабом и тензодатчиком, преобразователь в модулированное напряжение постоянного тока, аналого-цифровой преобразователь и регистратор в виде персонального компьютера. Более подробно установка описана в п. 3.1.4. Для оценки геомагнитных возмущений использовалась амплитуда возмущений в единицах магнитной индукции (нТл из данных финской обсерватории Соданкюля).

Анализ влияния естественных возмущений магнитного поля Земли на краба выполнялся путем сравнения значений двигательной активности с ежеминутными данными индекса геомагнитной возмущенности (Рисунок 4.42). Для построения графика использовался компонент геомагнитного поля по оси Y (ось направлена с запада на восток). Эксперимент с крабами проводился с 4 по 7 ноября 2011 в фоновом режиме с дискретностью в одну минуту.

Рисунок показывает, что реакция краба на изменения в вариации геомагнитного поля (с 4 на 5 ноября) немного преждевременна – примерно на час до начала бури активность краба начинает расти, но своего пика активности достигает уже после максимума бури. После максимума активности наблюдается достаточно резкий спад, и краб постепенно «успокаивается», другими словами активность краба становится более равномерной.

Таким образом, показатель активности крабов достаточно точно отображает изменения в геомагнитном поле Земли, а преждевременная реакция позволяет говорить о наличии у крабов эффекта предчувствия.

Следует отметить, что в этом нет ничего особенно неожиданного. В частности, по имеющимся данным у некоторых людей тоже регистрируется эффект «предчувствия» [75].

### Влияние геомагнитных вариаций на активность краба

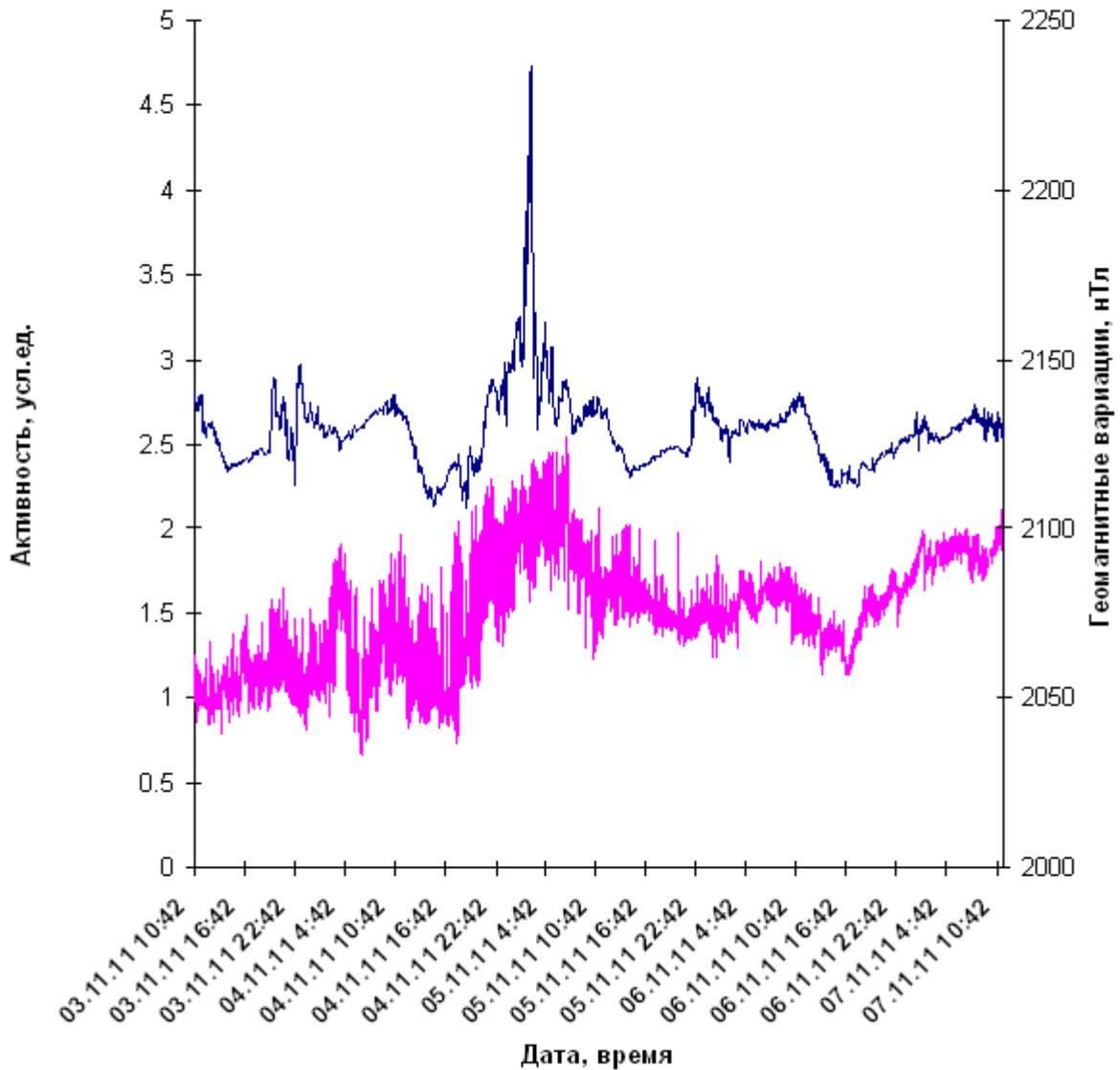


Рисунок 4.42 – Реакция краба на геомагнитную бурю. Верхняя запись – компонент Y (ось справа), нижняя запись – активность краба (ось слева).

#### Воздействие искусственным переменным магнитным полем.

Для воздействия искусственным переменным магнитным полем экспериментальный бассейн крабами помещался в соленоид, по которому пропускался ток крайне низкой частоты на задаваемых дискретно частотах. Частоты выбирались из диапазона от 0,1 Гц до 15 Гц. Магнитное поле в соленоиде и, соответственно, в бассейне рассчитывалось по величине пропускаемого тока.

Каждый эксперимент, как и в случае с гидробионтами, длился около 3 часов: 1-ый час – фоновая запись, 2-ой час - непосредственно воздействие искусственным переменным магнитным полем с определенной частотой и 3-ий час – повторная фоновая запись. Регистрация двигательной активности краба велась с дискретностью в 1 секунду [58]. На рисунке 4.43 представлен пример изменения дисперсии активности краба во время эксперимента на 8 Гц, Аф- дисперсия активности после применения фильтра Поттера. Можно отметить, что воздействие в 8 Гц создает эффект подавления дисперсии активности, это, видимо, связано с геофизическими факторами.

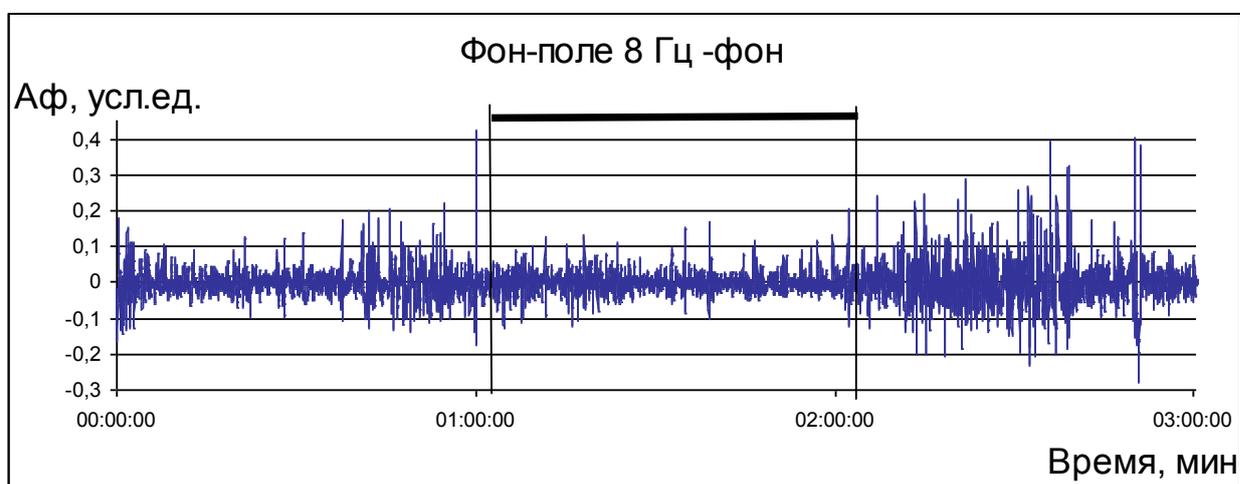


Рисунок 4.43 – Характер изменения дисперсии активности краба при воздействии полем 8 Гц, опыт 2011 года.

Для получения зависимостей двигательной активности краба от частоты воздействующего поля по результатам экспериментов с крабами на каждой частоте были получены такие характеристики, как реакция и изменчивость дисперсии активности краба на предъявление переменного магнитного поля. По рассчитанным данным построены графики, демонстрирующие полученные зависимости (Рисунок 4.44).

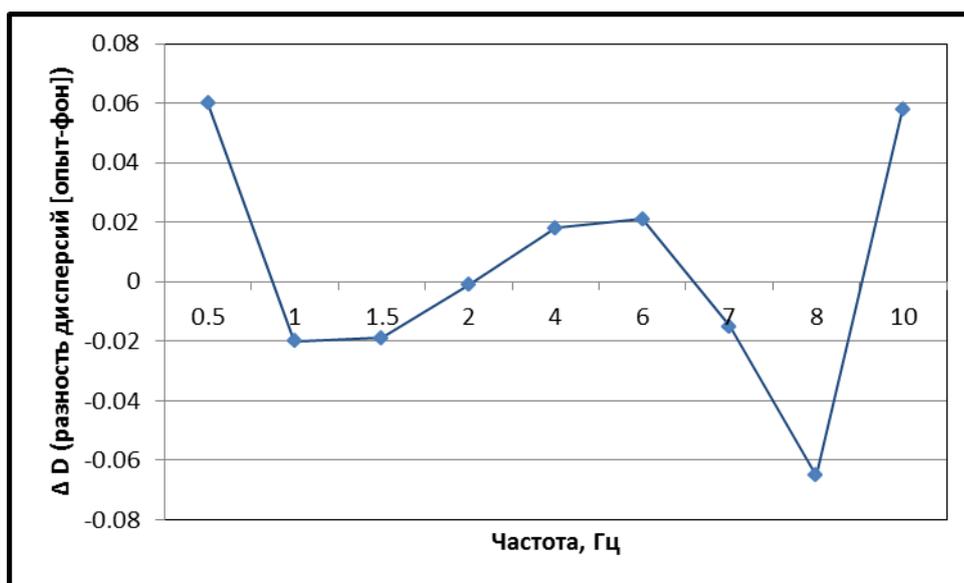


Рисунок 4.44 – Зависимость разности дисперсий (опыт-фон) от частоты воздействия (из работы [58]).

Полученные зависимости хорошо демонстрируют два участка, которые связаны с усилением реакции краба на действующие частоты: участок 1-1,5 Гц и участок в области 7-8 Гц. Первый из них, очевидно, характерен для частоты сердечных сокращений и частоты дыхания при постоянной температуре воды в экспериментальном бассейне. Второй участок никак не связан с физиологическими функциями краба, и может рассматриваться как геофизический экстремум.

#### Особенности реакций крабов без использования фильтрации данных.

Как было показано ранее (п.4.2.1), дисперсия не всегда наилучшим образом характеризует реакцию животных на предъявляемые внешние факторы. Часто более показательной характеристикой является среднее значение реакции. При этом необходимо использовать только последовательные квазистационарные участки рядов данных. Применительно к крабам, которые существенно менее подвижны, чем сомовые рыбы, это особенно важно.

Поэтому исходные ряды данных, полученные ранее О.М.Владимировой, были обработаны здесь именно таким способом. Получившиеся при этом результаты

существенно отличаются от результатов рисунка 4.44. Частотные «окна» реакции располагаются в других диапазонах (рисунок 4.45).

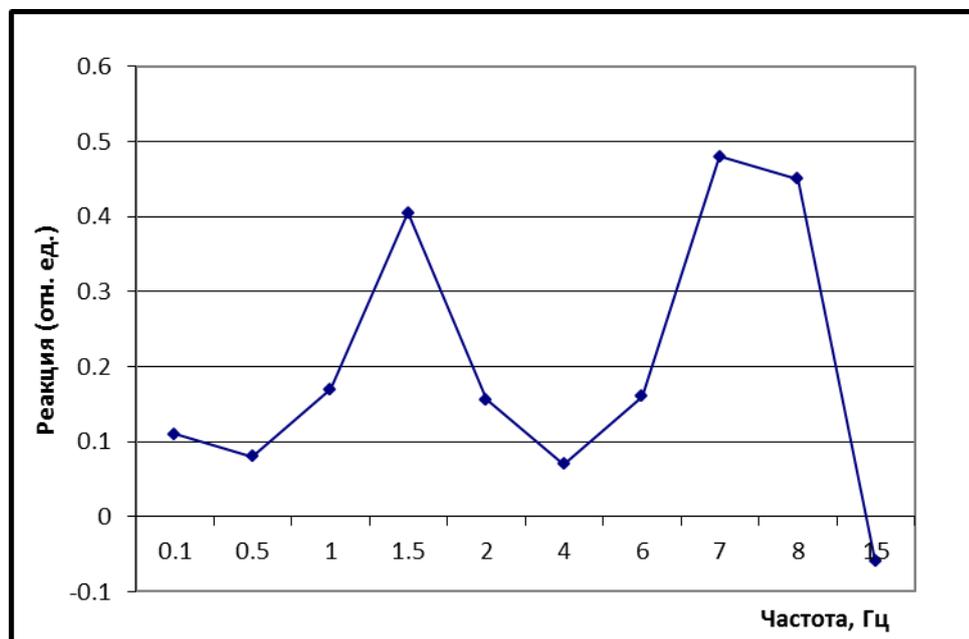


Рисунок 4.45 – Прямая реакция краба (без фильтрации данных) на воздействие переменным магнитным полем.

Первое «окно», как и у рыб, является физиологическим и характеризует реакцию возбуждения на частоте сердечных сокращений (см. например рисунок 4.40). Второе «окно», как и у рыб, является геофизическим.

Следует отметить, что прямая реакция является преимущественно положительной (краб старается «уйти» от воздействующего поля и натягивает нить, связывающую его с регистрирующей установкой).

Полученные результаты свидетельствуют об определенной универсальности выделяемых «окон». Т.е. они существуют как у пресноводных животных (карповые, сомовые рыбы), так и у морских беспозвоночных (крабы).

#### 4.3.2 Влияние проходящих циклонов на двигательную активность камчатских крабов.

В предыдущих главах уже упоминались опыты с гидробионтами, когда исследовалось влияние проходящих циклонов на двигательную активность рыб. В продолжение этих экспериментов также проводились работы с крабами.

Крабы являются, во-первых, морскими, а во вторых – беспозвоночными животными. Тем более интересно, могут ли они реагировать на гидрометеорологические процессы и предчувствовать их приближение.

Исследование реакции камчатского краба на приближение и прохождение циклонов было предпринято 28–29.11.2011 г. и 21–22.12.2011 г.

28.11.2011 дискретность 60 с

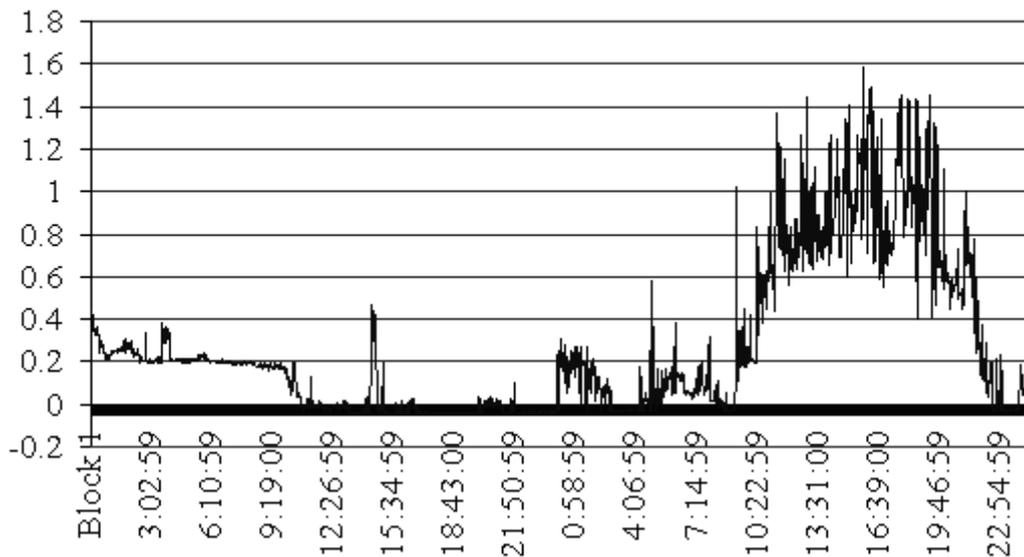


Рисунок 4.46 – Реакция камчатского краба на приближение мощного циклона.

На рисунке 4.46 показана реакция краба на приближение циклона. Этот циклон, в основном, располагался над Норвегией, что отображено на приведенных синоптических картах, и воздействовал на Мурманск своей передней частью. Затем 29.11.2011 г. он повернул на юг и ушел от Мурманска (Рисунки 4.47, 4.48). Соответственно, краб «успокоился», и активность его снизилась (конец записи на рисунке 4.46).

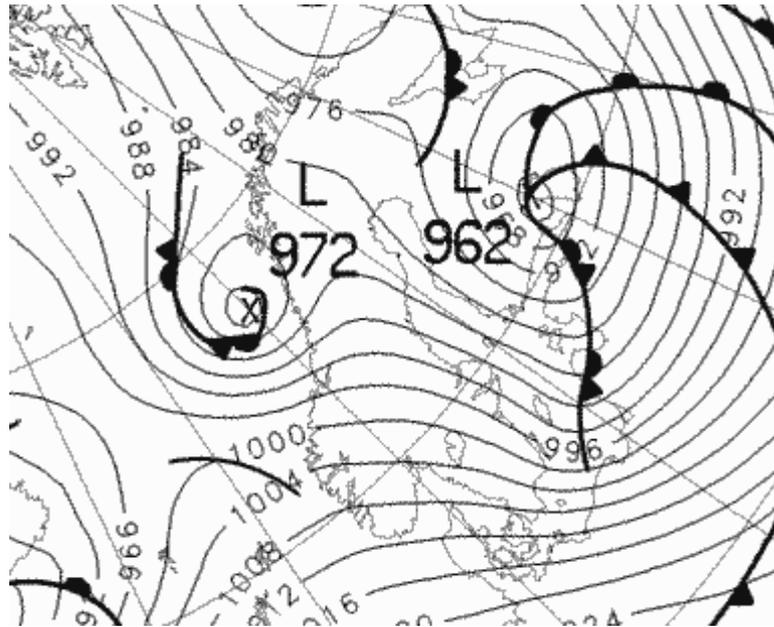


Рисунок 4.47 – Синоптическая карта с циклоном над Норвегией  
28.11.2011 г. 04.00 МСК.

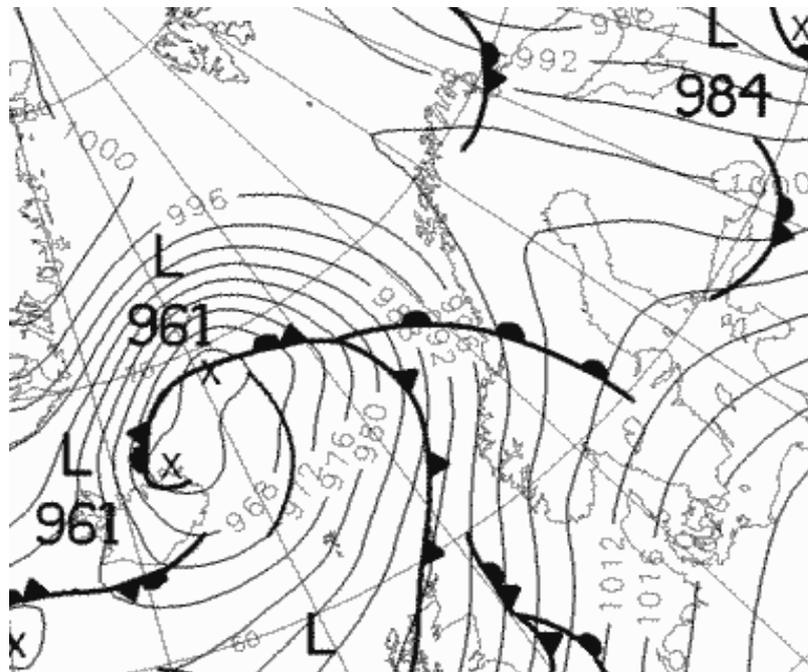


Рисунок 4.48 – Циклон, воздействующий на Норвегию, смещается к югу.  
29.11.2011 г. 04.00 МСК. Возбуждение краба затухает (см. рисунок 4.46).

Подобная ситуация наблюдалась 22 декабря 2011 г. Циклон с фронтом окклюзии непосредственно воздействовал на территорию Мурманска (рисунок 4.50). Реакция краба однозначна (рисунок 4.49).

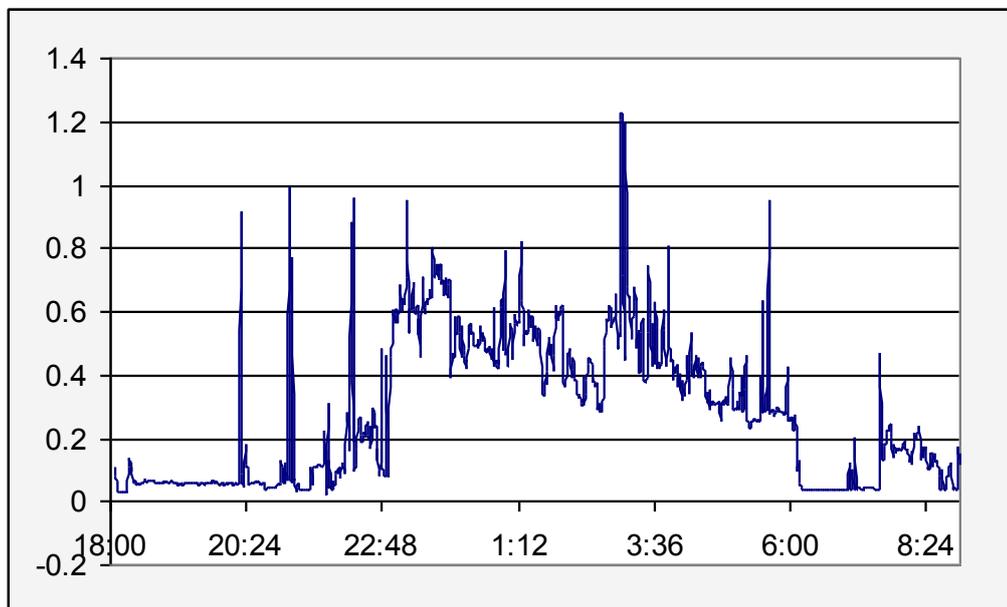


Рисунок 4.49 – Изменение двигательной активности крабов в период проведения эксперимента с 18:05 21/12/11 по 9:00 22/12/11.

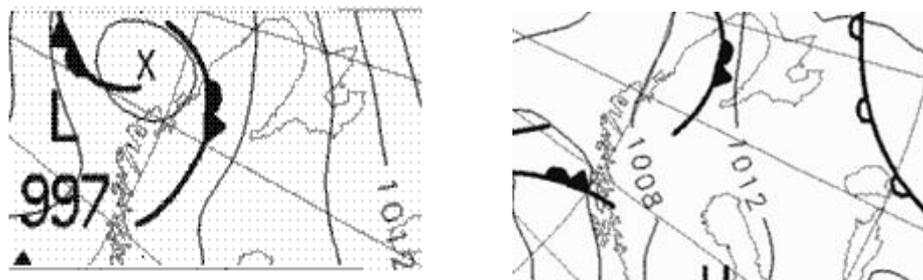


Рисунок 4.50 – Фрагменты синоптических карт в районе исследований (за 21.12.11 - слева и 22.12.11 – справа) в 04 часа по московскому времени).

Ранее уже говорилось о реакции краба на геомагнитные возмущения (магнитные бури). Чтобы исключить такие эффекты одновременно с описанными экспериментами была получена запись вариаций геомагнитного поля в обсерватории Соданкюля (Финляндия), расположенной максимально близко от Мурманска. На рисунке 4.51 показаны такие данные за период времени возбуждения двигательной активности краба, из которых следует, что возбуждение

краба определяется не геомагнитными возмущениями, а именно прохождением циклона, поскольку магнитная обстановка на этот период была спокойная.

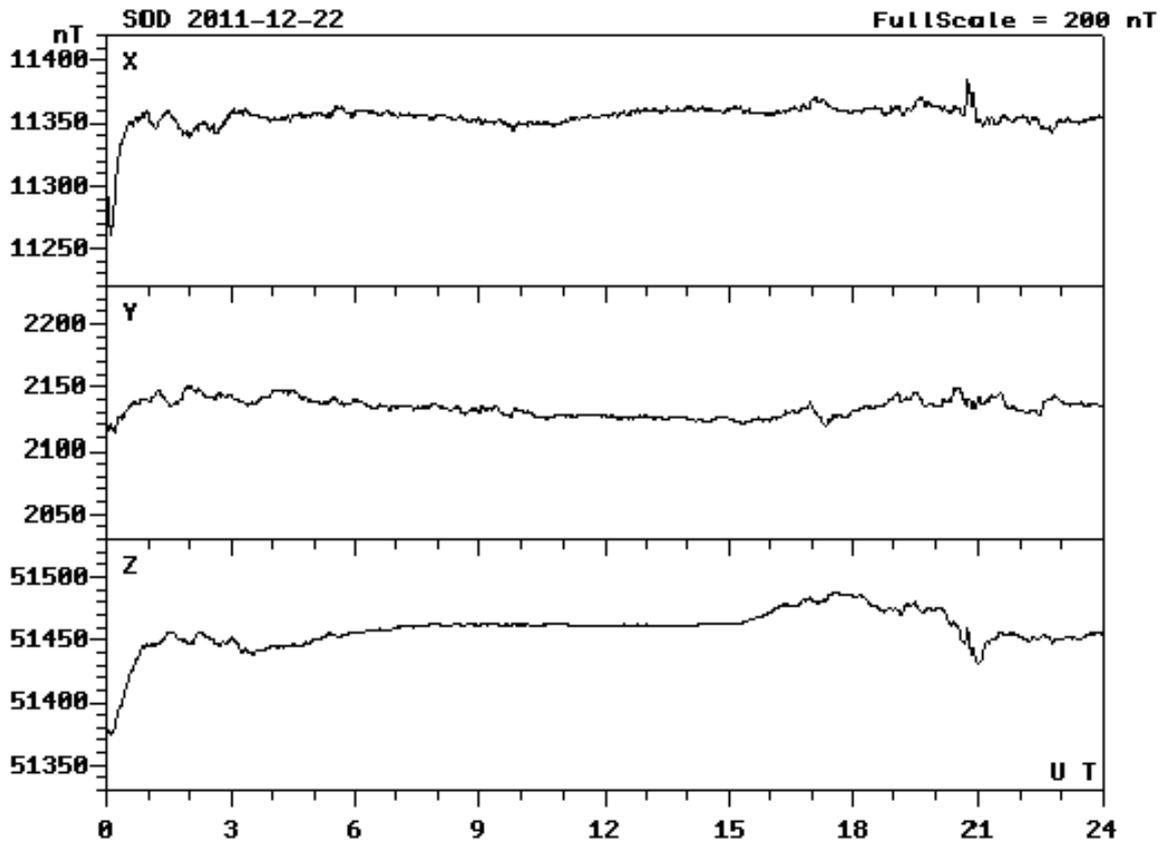


Рисунок 4.51 – Геомагнитная обстановка за 22.12.2011 г. при прохождении циклона.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что краб реагирует на приближение и прохождение циклонов. В соответствии с полученными данными о частотных характеристиках магниточувствительности можно сделать вывод, что животное реагирует на переменные магнитные поля, возбуждаемые этими циклонами, причем, преимущественно на частоты 7-8 Гц.

#### 4.4 Время задержек реакций («латентные периоды») при воздействии на гидробионтов переменными электрическими или магнитными полями

В п. 3.2.1 были рассмотрены теоретические основы воздействия переменных электрических и магнитных полей на активность гидробионтов. Основой для этого рассмотрения послужили известные экспериментальные факты о противоположных реакциях гидробионтов на так называемые «анодический» и «катодический» стимулы, то есть на предъявление электрических полей различной полярности. Соответственно, при воздействии знакопеременными полями можно было бы ожидать отсутствие реакций, что на самом деле не получается.

В п. 3.2.1 рассмотрен механизм формирования реакций за счет нелинейных динамических свойств связи «воздействие-реакция». Благодаря этому появляется эффект накопления элементарных реакций, названный «кумулятивным эффектом».

В наших экспериментах выявлены такие кумулятивные задержки реакций у некоторых гидробионтов. На рисунке 4.52 показан вид начального участка реакции камчатского краба *Paralithodes camtchaticus*. Методика экспериментов описана в п. 3.2 и в нашей работе [76].

Включение воздействующего фактора (переменное магнитное поле частотой 1 Гц) не действует сразу – реакция затягивается примерно на 54 с затем по закону, близкому к логарифмическому, достигает своего максимального значения еще примерно через 16 с.

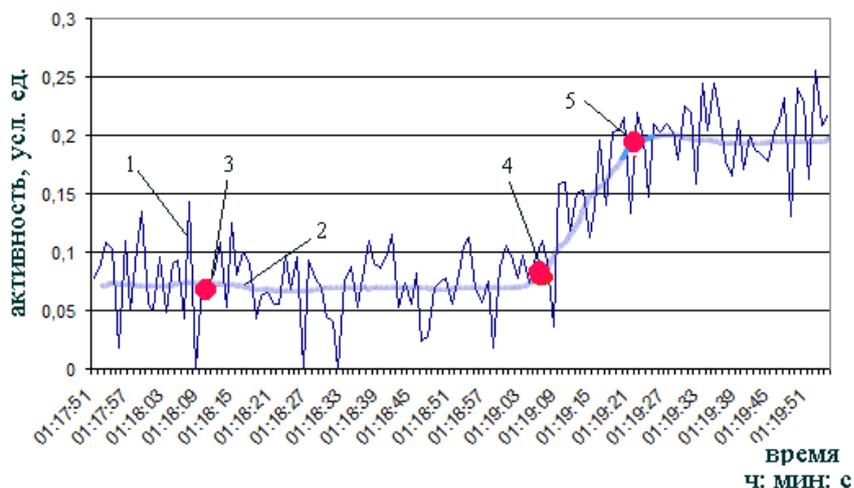


Рисунок 4.52 – Реакция краба *Paralithodes camtchaticus* на магнитное поле с частотой 1 Гц. Обозначения: 1 – двигательная активность, дискретность 1 с; 2 – сглаженная кривая активности; 3 – начало воздействия (01:18:09); 4 – начало реакции (01:19:06); 5 – максимальная реакция (01:19:22).

Следует отметить отсутствие «гладкости». Средний период колебаний примерно 3-4 с, видимо, обусловлен некоторыми физиологическими особенностями, которые нам неизвестны. Причем, такие колебания сохраняются после начала воздействия знакопеременным полем, а также после достижения максимальной реакции. Периоды 1 с в результатах не выявляются. Результатом воздействия является *повышение* активности (отчуждение, попытка уйти из зоны воздействия).

Можно ожидать, что с повышением частоты задержка реакции должна уменьшаться, поскольку возрастает количество знакопеременных «стимулов». Характерный пример приведен на рисунке 4.53. Здесь полная задержка реакции (до достижения максимальной реакции) происходит всего лишь за 3 с. При этом важно отметить, что эффект возрастания активности существенно больше (в сравнении с рисунком 4.52).

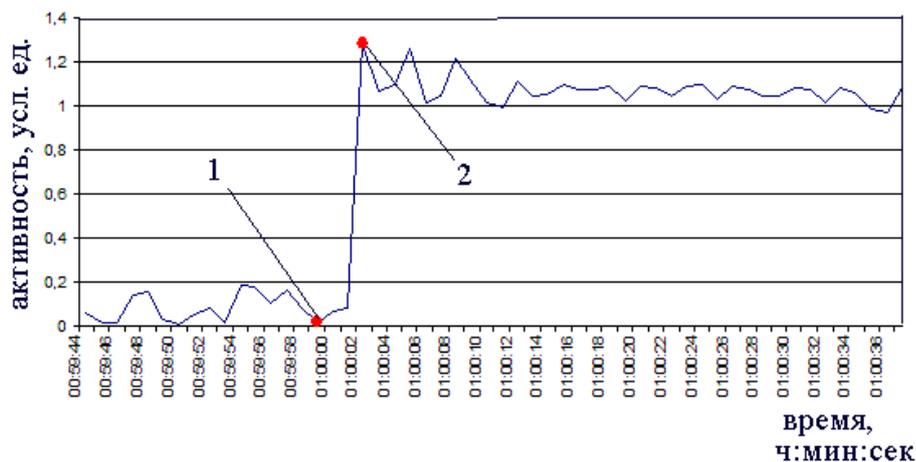


Рисунок 4.53 – Реакция краба *Paralithodes camtchaticus* на магнитное поле с частотой 8 Гц. Обозначения: 1 – начало воздействия, 2 – максимальная реакция; дискретность наблюдений 1 с.

Здесь также наблюдаются вариации активности с периодами 3-4 с, как и в предыдущих результатах. При этом амплитудные значения вариаций примерно соответствуют значениям на рисунке 4.52 (см. шкалу активности).

В ранее проводившихся экспериментах нам представлялась более интересной реакция дисперсии активности. Дисперсия, как известно, проявляется в колебаниях относительно среднего значения. Расчет *текущей* дисперсии проводился по 20-ти точкам с шагом в 1 с, значение соотносилось к 10-й точке.

Дисперсия рассчитывалась после фильтрации рядов полосовыми цифровыми фильтрами Поттера, при этом устранялись тренд и высокочастотные шумы. На рисунке 4.54 приведен характерный пример изменчивости двигательной активности краба относительно нулевого среднего. Дисперсия резко изменяется после точки 2 (01:05:15) с задержкой по отношению к началу воздействия 1 (01:05:01).

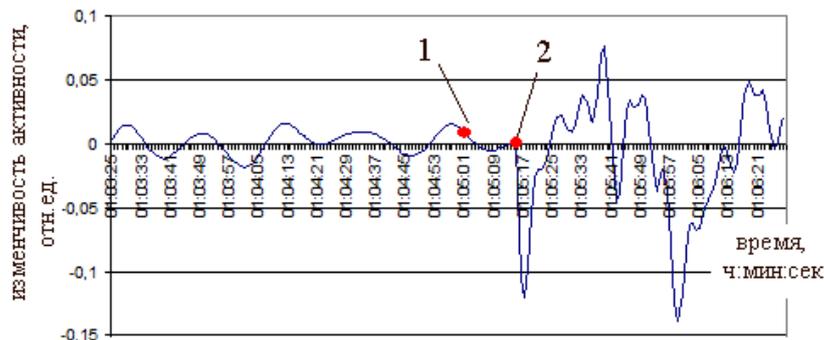


Рисунок 4.54 – Задержка изменчивости двигательной активности краба *Paralithodes camtchaticus* на переменное магнитное поле частотой 0,5 Гц. Обозначения: 1 – начало воздействия; 2 – начало реакции.

Полезно отметить интересную особенность: колебания двигательной активности до воздействия МП были сравнительно медленными (18-20 с), после воздействия возрос размах колебания, а период уменьшился до 6-7 с.

На рисунке 4.55 показан пример задержки реакции уже по рассчитанной дисперсии активности. Реакция дисперсии получается как бы «затянутой» (рисунок 4.55 в сравнении с рисунком 4.53), что вполне понятно, поскольку связано с особенностями расчета дисперсии (20 точек, смещаемых с шагом на одну точку).

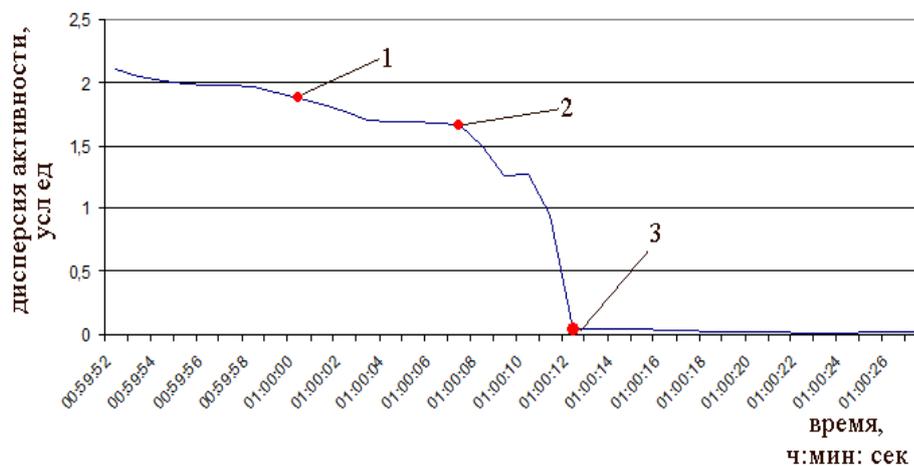


Рисунок 4.55 – Задержка реакции дисперсии двигательной активности краба *Paralithodes camtchaticus* на ПемП частотой 8 Гц. Обозначения: 1 – начало воздействия; 2 – начало реакции дисперсии; 3 – максимально ожидаемая реакция.

Предварительные оценки зависимости времени реакции от частоты показаны на рисунке 4.56. Здесь, в целом, подтверждается предположение об уменьшении времени реакции с увеличением частоты. Наблюдается небольшая немонотонность при увеличении частоты, но это требует дополнительного изучения. Тем более что доверительные интервалы не могли быть определены из-за слишком малого количества данных.

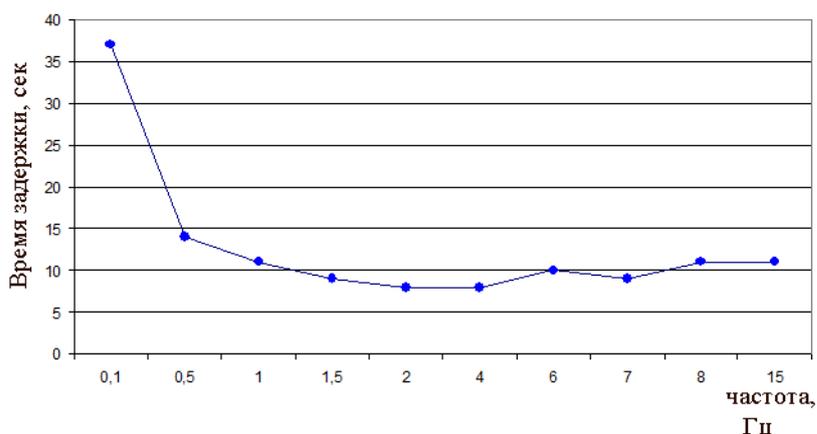


Рисунок 4.56 – Предварительные оценки задержек реакции дисперсии двигательной активности краба *Paralithodes camtchaticus* на воздействие переменным магнитным полем различных частот.

*Сомовые рыбы.* Изучение задержек реакций предпринималось нами также в экспериментах с сомовыми рыбами. Определялись реакции небольших групп (8-11 особей) сомиков *Corydoras aeneus* на воздействие переменными электрическими и магнитными полями в КНЧ-диапазоне. Методика проведения экспериментов описана в нашей работе [76].

Рыбы более подвижны и не могут столь «остро» реагировать на изменения внешних, в частности – электромагнитных, факторов как донные животные – крабы, для которых штормовое волнение на поверхности моря, видимо, может оказаться весьма опасным из-за возможных ударов о камни. Ведь штормовое волнение при типичных длинах волн 100-150 метров может проникать на глубины 50-70 метров.

У сомиков *Corydoras aeneus* задержки реакций дисперсии двигательной активности аналогично спадают с увеличением частоты (рисунок 4.57), но

немонотонно. Эксперименты проводились как в магнитном поле (рисунок 4.57), так и в однородном электрическом поле (рисунок 4.58)

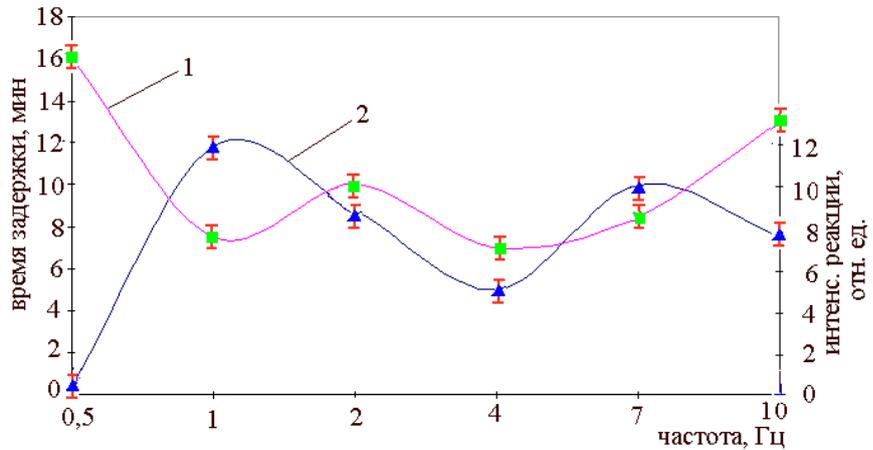


Рисунок 4.57 – Время задержки *дисперсии* реакции и интенсивность реакции сомиков *Corydoras aeneus* при воздействии переменным *магнитным* полем различных частот. Обозначения: 1 – время задержки; 2 – интенсивность реакции.

Интенсивность реакции на этих графиках указана для попытки связать немонотонный характер задержек и бимодальный характер интенсивности реакций. Бимодальный характер реакций рассмотрен нами в работе [77] применительно к проблеме получения гидробионтами информации о гидрометеорологических процессах над водоемами. На приводимых графиках можно отметить, что интенсивность реакции («восприимчивость» переменного поля) и время задержки реакции связаны. Причины такой связи пока не совсем ясны.

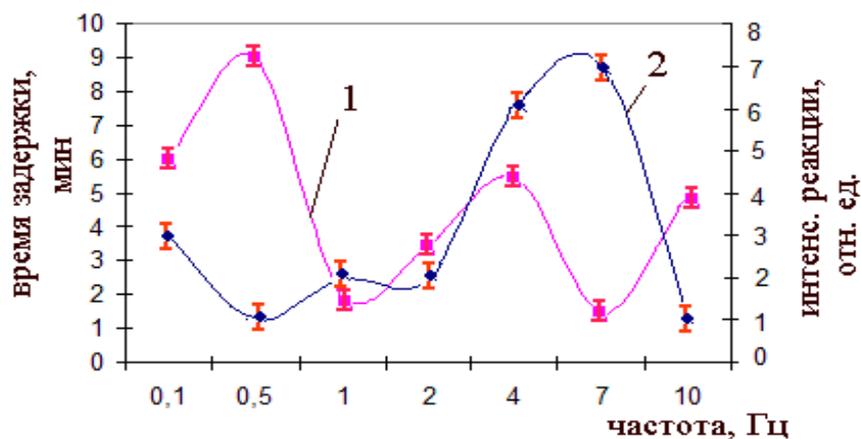


Рисунок 4.58 – Время задержки *дисперсии* реакции и интенсивность реакции сомиков *Corydoras aeneus* при воздействии переменным электрическим полем различных частот. Обозначения: 1 – время задержки; 2 – интенсивность реакции.

Наши предположения о *немонотонном* характере задержек реакций сводятся к тому, что рассмотренные здесь *нелинейные* динамические свойства у гидробионтов характеризуются уравнениями более высоких порядков, чем уравнение (3.3) с решениями (3.6). Однако эти предположения требуют дальнейших исследований.

Обобщенные результаты, полученные на различных частотах воздействия переменных полей на различных гидробионтов представлены в таблице 4.4 с указанием доверительных интервалов для экспериментов с рыбами при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 4.4 – Время задержки реакции

Сомики, электрическое поле		Сомики, магнитное поле		Крабы, магнитное поле	
Частота, Гц	Время задержки, мин	Частота, Гц	Время задержки, мин	Частота, Гц	Время задержки, сек
<b>0,1</b>	<b>6 ±0,05</b>	<b>0,5</b>	<b>16.0±0,05</b>	<b>0,1</b>	<b>37,5</b>
<b>0,5</b>	<b>9.5 ±0,05</b>	<b>1</b>	<b>7.5±0,05</b>	<b>0,5</b>	<b>14</b>
<b>1</b>	<b>2 ±0,06</b>	<b>2</b>	<b>10±0,05</b>	<b>1</b>	<b>10,5-11</b>
<b>2</b>	<b>3.5 ±0,05</b>	<b>4</b>	<b>7.0±0,06</b>	<b>2</b>	<b>7,5-8</b>
<b>4</b>	<b>5.5 ±0,05</b>	<b>7</b>	<b>8.5±0,07</b>	<b>4</b>	<b>7,5-8</b>
<b>7</b>	<b>1.5 ±0,06</b>	<b>7 (циклон)</b>	<b>12.0±0,07</b>	<b>7</b>	<b>9-9,5</b>
<b>10</b>	<b>5 ±0,06</b>	<b>10</b>	<b>13.0±0,06</b>	<b>8</b>	<b>10,5-11</b>

#### 4.5 Поиск механизмов предчувствия посредством влияния на физико-химические процессы. Эксперименты со штормгласом

Полученные результаты, освещённые в предыдущих разделах, приводят к выводу, что изученные, а также, по-видимому, многие другие, еще неизученные, неэлектрочувствительные гидробионты обладают чувствительностью к слабым переменным магнитным полям. Механизм магниточувствительности в настоящее время неизвестен. Предположения о том, что гидробионты содержат некоторые чувствительные к магнитному полю элементы, в частности, так называемые *магнитосомы*, не выдерживает критики. Подобные элементы в живых организмах однозначно не выявлены, тем более, отсутствуют гипотезы об их возможном взаимодействии с центральной нервной системой организма [15,16].

Подобная неопределенность приводит к идее восприятия переменных магнитных полей целостным организмом, включая клеточные структуры. По нашим предположениям реакция клеточных структур на переменные магнитные поля обусловлена реакцией неравновесных процессов в этих структурах.

Неравновесные биологические процессы широко изучаются в биофизике (см. например, классический учебник Волькенштейна М.В. [53]). В частности, в этой работе [53] описаны различные виды подобных процессов. Утверждается, что подобные процессы могут меняться под воздействием слабых внешних факторов, которые способны смещать в какую-либо сторону создавшиеся для данного процесса частные условия равновесия.

Также там показано, что подобные процессы существуют в физико-химических системах, которые могут использоваться как модели биологических систем.

В наших задачах поиска физического механизма предчувствия гидробионтами опасных гидрометеорологических процессов было решено использовать в качестве модели такую неравновесную физико-химическую систему как штормглас. Штормглас, или *штормовое стекло*, использовался моряками как предсказатель приближения морских штормов. Состав штормгласа известен и может несколько варьировать в различных конструкциях. Тем не менее, его основу создает ряд специфических веществ, которые образуют в своем сочетании неравновесную систему.

В целом, современный штормглас представляет собой запаянную стеклянную трубку, в которую помещается водно-спиртовой раствор калийной селитры, хлорида аммония и камфары в определенных пропорциях (рисунок 4.59).



Рисунок 4.59 – Изображение типичной колбы штормгласса.

Существуют различные варианты конкретных рецептов, которые можно найти в литературе. Есть сведения, что штормгласс применялся моряками ещё в XVIII-XIX вв. Показаниями служила наблюдаемая картина кристаллизации при различных погодных условиях.

В проведённых экспериментах использовалась стандартная ампула штормгласса в виде сосуда, заполненного смесью камфары, нашатыря и калиевой селитры (4:1:1), растворенных в смеси спирта с дистиллированной водой. В ранее опубликованных сообщениях различных авторов, например [78,79], рассматривались преимущественно визуальные наблюдения за реакцией штормгласса, при этом синоптическая обстановка оценивалась также визуально.

Техническим преимуществом рассмотренной ниже установки является возможность объективной автоматической непрерывной регистрации этих характеристик.

#### 4.5.1 Экспериментальная установка

Устройство для регистрации изменчивости характеристик физико-химической системы штормгласса содержит колбу штормгласса 1 с физико-химической системой. Колба штормгласса размещена в футляре теплоизоляционной камеры 2 со светоизолятором 3. Футляр снабжен узкими окошками (светопропускающими окнами), а система наблюдения содержит фокусируемый отражателем 4 источник света 5, размещенный возле одного из окошек (выходного светопропускающего окна), и фотоприемник 6, размещенный у противоположного окошка футляра, при этом колба штормгласса ориентирована вертикально с пересечением луча света примерно посередине своей структуры, а фотоприемник 6 через электронную схему усилителя 7 подключен к аналого-цифровому входу персонального компьютера 8 [80].

Устройство функционирует следующим образом. Для проведения наблюдений и регистрации колба штормгласса 1 размещается в термо- 2 и светоизолированном боксе 3, лишь одно окошко оставалось открытым. Через это окошко пропускается сфокусированный отражателем 4 пучок света от источника 5. После прохождения колбы этот пучок воспринимается фотоприемником 6, затем через электронную схему (усилитель) 7 сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в персональный компьютер (ПК) 8 (рисунок 4.60) [80].

Такая конструкция позволяет избавиться от субъективных ошибок наблюдений, от изменений температуры воздуха в месте расположения прибора, устранить влияние внешних источников света на оптическую систему прибора. При этом подключение к аналого-цифровому преобразователю персонального компьютера (ПК) обеспечивает требуемую непрерывную регистрацию оптической плотности в области изменчивости физико-химической структуры штормгласса.

Все это обеспечивает требуемый технический результат – возможность объективной автоматической непрерывной регистрации характеристик изменчивости структуры штормгласса.

Параллельно на второй канал АЦП поступал сигнал с измерителя естественного переменного магнитного поля с полосой пропускания в области 7-8 Гц (рисунок 4.61). В качестве датчика здесь использовалась индукционная катушка (40 000 витков) с ферромагнитным сердечником. Сигнал с катушки поступал на предусилитель, затем пропускался через фильтр низких частот, затем детектировался схемой на двух операционных усилителях. После этого сигнал поступал на второй канал АЦП ПК. Синоптические карты (приземный анализ), как и для экспериментов с рыбами, брались с общедоступного немецкого сайта.

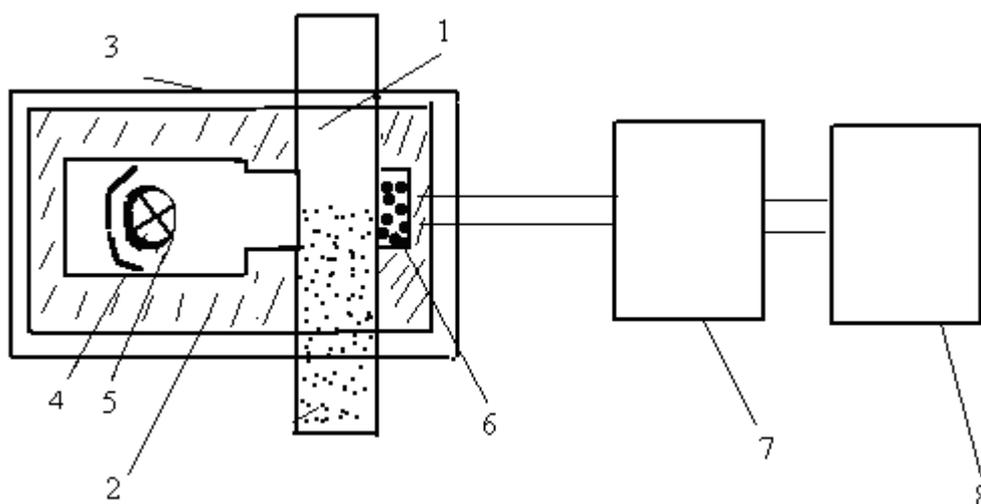


Рисунок 4.60 – Устройство для регистрации изменчивости характеристик физико-химической системы штормгласса (первый канал).

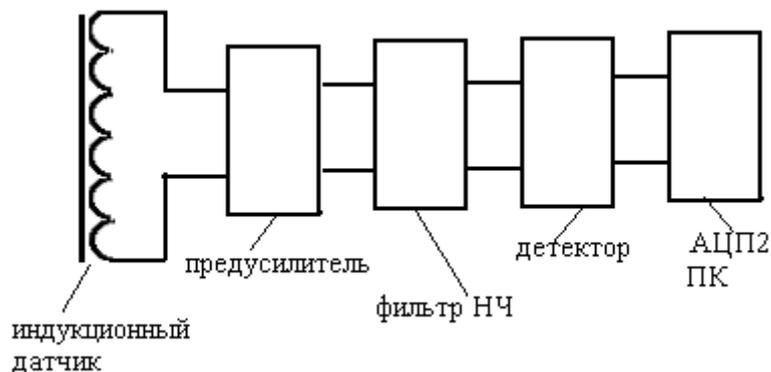


Рисунок 4.61 – Схема установки измерителя естественного переменного магнитного поля (второй канал).

Эксперименты проводились в предположении, что воздействие на структуру штормгласса оказывают электромагнитные поля в указанной области частот. Ранее [1] было выявлено, что циклональные образования и атмосферные фронты возбуждают в окрестности такие поля, и они могут распространяться в направлении движения циклона до 1000-1500 км. Индукция в непосредственной близости от циклона может достигать 10-15 нТл.

## 4.5.2 Результаты наблюдений

В ходе проведённых экспериментов со штормгласом удалось выяснить, что действительно существуют синхронные «события» в записях оптической плотности штормгласа и возмущений индукции в области частот 7-8 Гц [81]. Эти «события» соответствуют прохождению циклона с фронтальными разделами (рисунки 4.62 - 4.65). Указанные «события» определялись путём статистического анализа рядов, полученных по записям двух каналов, в программном пакете «Mesosaur».

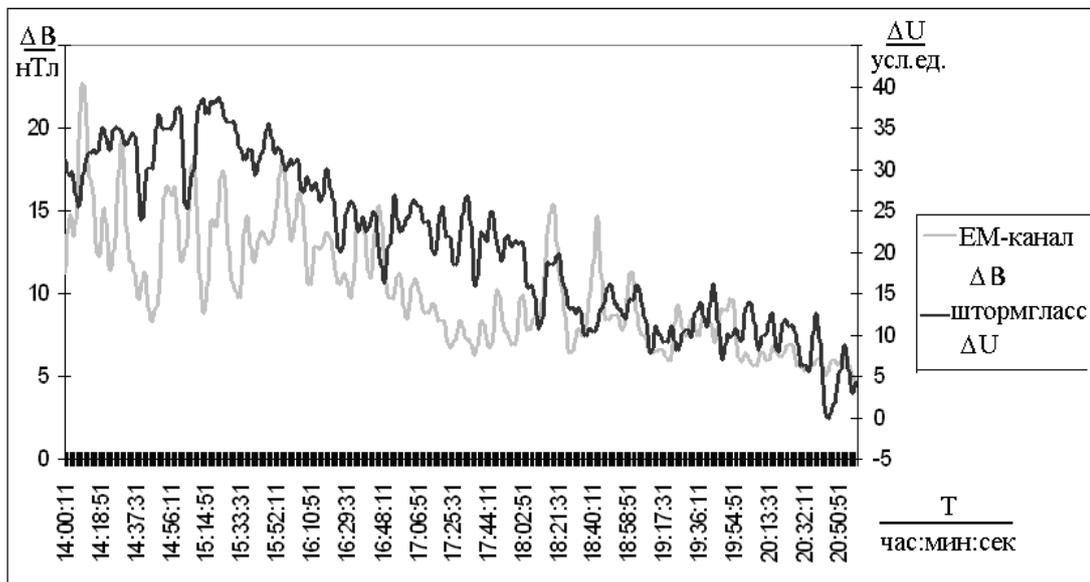
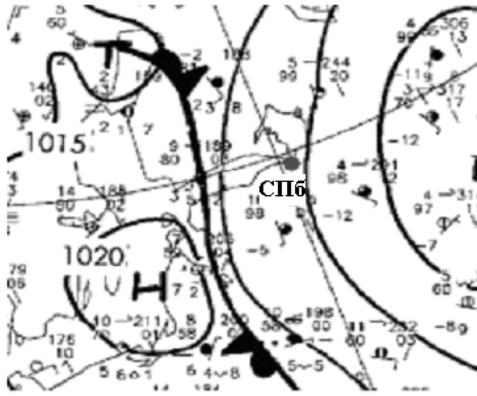
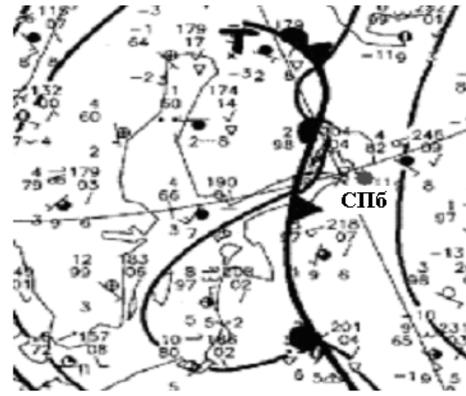


Рисунок 4.62 – Графическая зависимость данных, полученных по двум канала (EM-каналу и штормгласу) с 14:00:11 по 21:00:51 10.04.09.  $\Delta B$  – вариации индукции,  $\Delta U$  – вариации сигнала штормгласа. Значимый коэффициент корреляции = 0.73.

Время задержки реакции штормгласа = 2-3 мин.



16 часов МСК



22 часа МСК

Рисунок 4.63 – Синоптические карты района исследования (10.04.09 на 16 час. и 22 час. по московскому времени). Пункт наблюдения – город Санкт-Петербург (СПб).

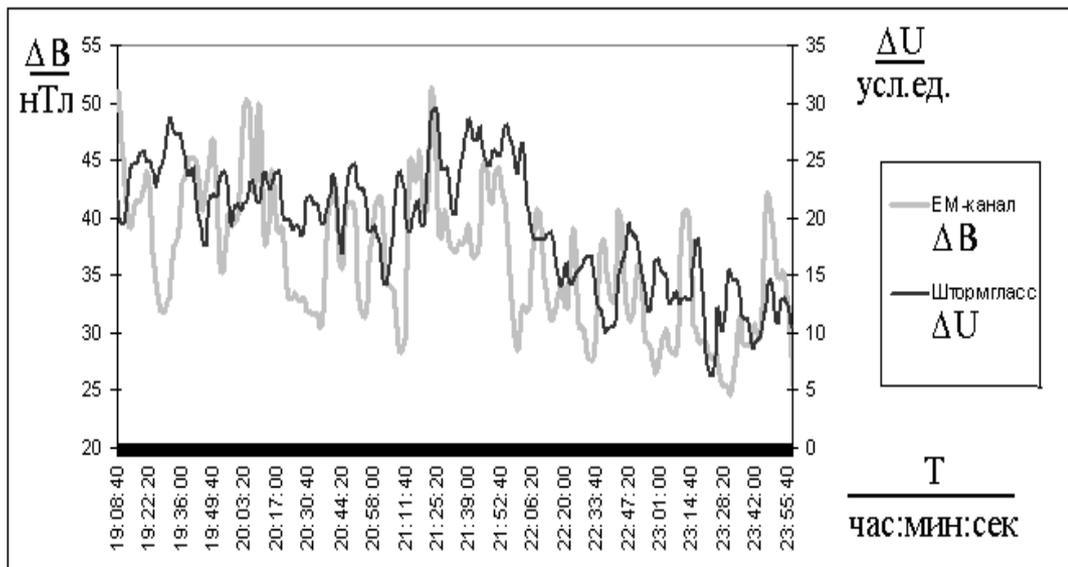
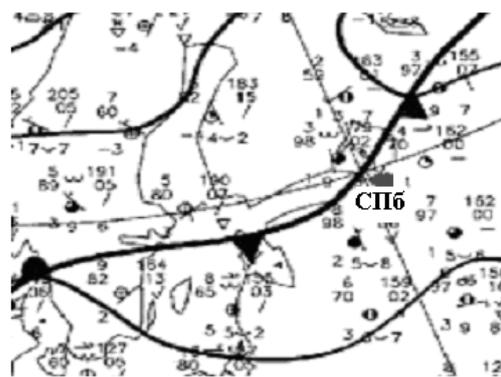


Рисунок 4.64 – Графическая зависимость данных, полученных по двум канала (ЕМ-каналу и штормглассу) с 19:08:40 по 23:58:00 14.04.09.  $\Delta B$  – вариации индукции,  $\Delta U$  – вариации сигнала штормгласса. Значимый коэффициент корреляции = 0.51. Время задержки реакции штормгласса = 8 мин.



16 часов МСК



22 часа МСК

Рисунок 4.65 – Синоптические карты района исследования (14.04.09 на 16 час. и 22 час. по московскому времени). Пункт наблюдения – город Санкт-Петербург (СПб).

Для оценки возможного «предчувствия» или задержки реакции на переменное электромагнитное поле сначала осуществлялось сглаживание рядов с помощью скользящего среднего, а затем проводился взаимнокорреляционный анализ сглаженных рядов. На рисунке 4.66 представлены результаты подобного анализа, а синоптические карты за время этого эксперимента приведены на рисунке 4.67. Наибольший коэффициент корреляции между двумя рядами составил 0.83 при сдвиге в 110 шагов, что соответствует 37 минутам при шаге равном 20 секундам. По данным эксперимента 09.04.09 реакция штормгласа на электромагнитные явления началась на 37 минут позже.

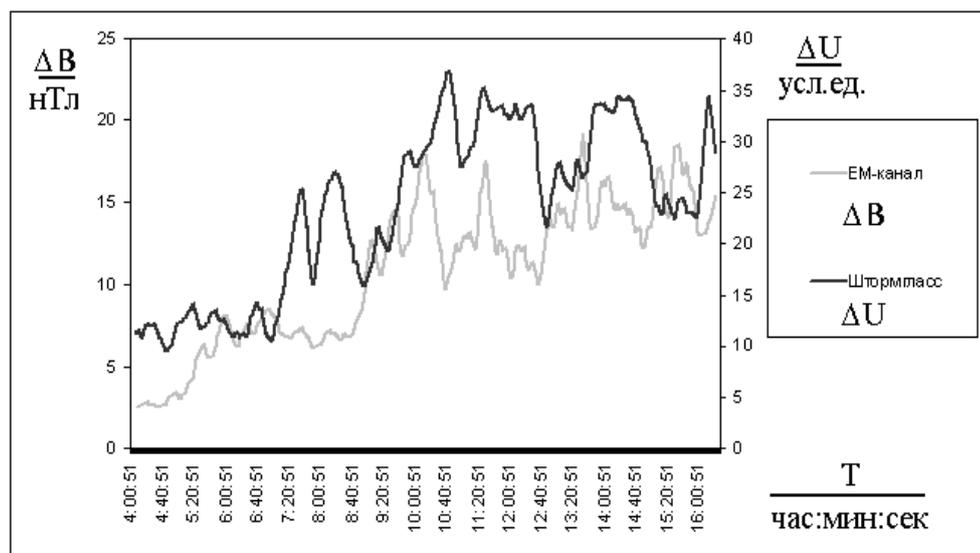
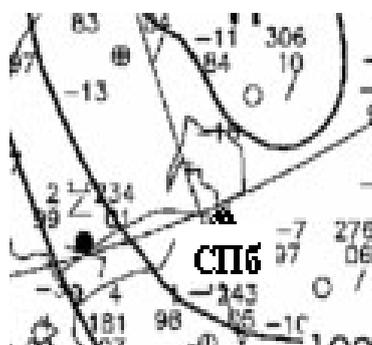
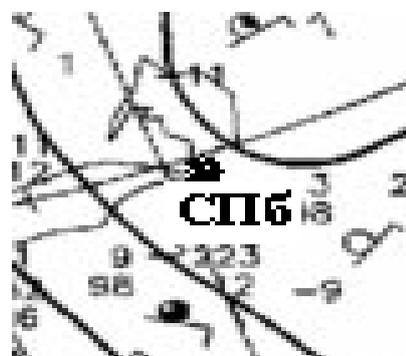


Рисунок 4.66– Пример статистического анализа рядов (04:00:51 – 16:28:51 09.04.09). Черная линия – сглаженная реакция штормгласса, серая линия сглаженная реакция электромагнитного канала.  $\Delta B$  – вариации индукции,  $\Delta U$  – вариации сигнала штормгласса. Всплеск реакции штормгласса слева от «события» неидентифицирован. Время задержки реакции штормгласса = 37 мин (110 шагов).



4 часа МСК



16 часов МСК

Рисунок 4.67 – Синоптические карты района исследования (09.04.09 на 4 час. и 16 час. по московскому времени). Ситуация антициклона. Пункт наблюдения – город Санкт-Петербург (СПб).

Интересные результаты получаются в противоположном случае, когда над пунктом наблюдений регистрируется антициклон. Перед приходом антициклона

наблюдалась сложная гидрометобстановка с фронтальными разделами. В связи с этим оптическая плотность штормгласса низкая, а затем возрастает (рисунок 4.66) в отличие от рассмотренных выше результатов. При этом сигнал ЕМ-канала возрастает (кривая показаний штормгласса, как и ранее, перевернута для наглядности). Все это убеждает, что показания штормгласса однозначно связаны с электромагнитными сигналами.

Однако не любой циклон и не любые фронтальные разделы, как связанные с циклоном, так и существующие отдельно, например, в барических ложбинах, формируют такие «события». Видимо, это говорит о том, что штормгласс, как «предсказатель» шторма, использовался моряками ввиду отсутствия более надежных методов. Он не может заменить современные методы прогноза по синоптическим картам, но при отсутствии таковых может оказать существенную помощь.

Также было отмечено возрастание сигналов штормгласса, характерное для ситуации, когда в районе исследования стоит антициклон. Это эквивалентно уменьшению оптической плотности, т.е. повышению прозрачности (сигнал с фотоприемника  $\Delta U$  меняется обратно оптической плотности).

## Заключение

Представленные результаты посвящены изучению вопроса о возможном предчувствии биологическими (в частности рыбами и крабами) и физико-химическими системами (на примере штормгласса) опасных гидрометеорологических явлений. Затронутая тема очень актуальна на сегодняшний день, она непосредственно связана с одной из важнейших задач гидрометеорологии – предсказанием опасных процессов природы. К сожалению, на сегодняшний день наши знания о возможных механизмах предчувствия у животных довольно малы. Скорее всего, гораздо больше свидетельств о возможностях животных в плане предчувствия различных катастроф, чем физических объяснений механизмов этого предчувствия. В настоящее время остается много неясного в действии и работе специальных органов живых организмов, существование которых уже доказано, однако предположение о том, что реакция происходит на уровне клеточных структур, однозначна.

В работе рассматриваются различные примеры, доказывающие наличие единого механизма предчувствия у неравновесных биологических и физико-химических систем. Особенное внимание уделено рыбам, как обитателям водной среды, изучение которой косвенно и затрагивают проведенные исследования. В водной среде, не привычной для обитателей суши, возможна весьма своеобразная система сигнализации, использующаяся рыбами и другими водными животными.

В данной работе отмечено, что геомагнитное поле Земли оказывает значительное воздействие, как на рыб, так и на других животных. Познание возможных механизмов и способов предчувствия, а также работы специальных органов живых существ имеет очень большое теоретическое и практическое значение и может способствовать разработке методов прогнозирования опасных явлений.

Целью диссертации являлось изучение эффектов восприятия и предчувствия опасных гидрометеорологических процессов рядом пресноводных и морских гидробионтов и выявление возможных физических механизмов этих эффектов. В

ходе экспериментальных исследований были получены следующие основные результаты.

- Для проведения экспериментов были разработаны и использованы две специальные измерительные установки. Новизна технических решений подтверждена патентами РФ.
- Выявлена суточная биоритмика двигательной активности (ДА) рыб по результатам 34-часового эксперимента в спокойных геофизических и гидрометеорологических условиях; эти данные были использованы при выявлении реакций рыб на гидрометеорологические процессы.
- Установлена зависимость средней двигательной активности (ДА) рыб от интенсивности геомагнитных возмущений (ГМВ). Максимальное значение коэффициента корреляции составляет  $-0.8$  для карпов и  $+0.87$  для сомов; различные знаки свидетельствуют о противоположной реакции этих рыб на магнитные возмущения.
- С использованием методов теории фракталов установлено, что поведение рыб носит преимущественно детерминированный характер; спады в «хаос» связаны с прохождением фронтов во время проведения экспериментов.
- При поиске механизмов восприятия и предчувствия экспериментально выявлены: интенсивность и время реакции рыб на предъявление искусственных переменных электрических и переменных магнитных полей в крайне низкочастотных диапазонах; выявленные экстремумы частотных зависимостей интерпретированы как физиологические (частота дыхания и частота сердечных сокращений) и геофизические (область 7-8 Гц).
- Экспериментально установлены реакции камчатских крабов на магнитные бури. Выявлен эффект предчувствия начала магнитных бурь.
- Экспериментально установлены реакции камчатских крабов на приближение и прохождение циклонов. Реакции характеризуются возбуждением двигательной активности крабов, что, видимо, связано со стремлением уйти из опасной зоны воздействия.

- Впервые проведены на специальной установке прямые приборные измерения изменчивости физико-химической структуры (штормгласс) с параллельными измерениями характеристик электромагнитного поля в области 6-8 Гц. Подтверждена гипотеза о реакции таких структур на электромагнитные поля проходящих гидрометеорологических процессов (циклонов), что, в свою очередь, приводит к подтверждению идеи магниточувствительности гидробионтов через подобные структуры.

### Список использованных сокращений

ЭМП	-	Электромагнитное поле
ДА	-	Двигательная активность
ЕЭМП	-	Естественное электромагнитное поле
ГМВ	-	Геомагнитные возмущения
КНЧ	-	Крайне низкие частоты
ПеМП	-	Переменное магнитное поле
ПеЭП	-	Переменное электрическое поле
МПЗ	-	Магнитное поле Земли
МГДП	-	Магнитогидродинамические поля
ВГВ	-	Внутренние гравитационные волны
СУС		Средний уровень сигнала
ММП	-	Межпланетное магнитное поле
ПК	-	Персональный компьютер
АЦП	-	Аналого-цифровой преобразователь
БС	-	Биологическая система
АЧХ	-	Аналого-частотная характеристика
ФЧХ	-	Фазово-частотная характеристика
ДВП	-	Дискретное вейвлет-преобразование
НВП	-	Непрерывное вейвлет-преобразование
ЧСС	-	Частота сердечных сокращений
ЧД	-	Частота дыхания

### Список используемой литературы

1. Степанюк И.А. Электромагнитные поля при аэро- и гидрофизических процессах. СПб: Изд. РГГМУ, 2002.–214 с.
2. Зимин А.В. Электромагнитные поля при гидрометеорологических процессах и оценка их влияния на отдельные виды гидробионтов : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 11.00.11. - Санкт-Петербург, 2000. - 130 с. : ил.
3. Доронин Ю.П., Степанюк И.А. Электромагнитное поле океана. СПб: Изд. РГГМИ, 1992.–87 с.
4. Доронин Ю.П. Физика океана. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2000. – 340с.
5. Баландина Н.Л. Роль и особенности учета космогеофизических экологических факторов в рыбопромысловых технологиях. – дисс... канд. техн. наук.– СПб, 2005. Специальность 25.00.36–Геоэкология, 139с.
6. Лаздин А.В., Протасов В.Р. Электричество в жизни рыб. – М.: Наука, 1977. – 88с.
7. Ольшанский В.М. Бионическое моделирование электросистем слабоэлектрических рыб. – М.: Наука, 1990. – 208с.
8. Пресман А.С. Электромагнитная сигнализация в живой природе (факты, гипотезы, пути исследования). – М.: Советское радио, 1974.–64с.
9. Протасов В.Р., Бондарчук А.И., Ольшанский В.М. Введение в электроэкологию. – М.: Наука, 1982. – 336с.
10. Bennett M.V.L., Clusin W.T. Physiology of the ampulla of Lorenzini. The electroreceptor of elasmobranchs//Sensory Biology of Sharks, Skates and Rays. Washington DC: Government Printing Office. 1978. P. 483 –505.
11. Kalmijn, A.J. (1982). Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes. Science 218:916–918.
12. Степанюк И.А. Особенности реакций биологических и физико-химических систем на внешние факторы. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2004. – 98с.

13. Фонарев Г.А. Об основных направлениях морских электромагнитных исследований. В кн.: Электромагнитные исследования в океане. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1983.– С.3-21.
14. Муравейко В. М., Степанюк И.А. К вопросу о возможном механизме предчувствия морскими животными биологически важных геофизических явлений // Морфофизиологические аспекты изучения рыб и беспозвоночных Баренцева моря: Сб. научн. трудов.– Апатиты: Изд.Кольского филиала АН СССР, 1982.– С. 85–92.
15. Степанюк И.А., Муравейко В.М. Переменное естественное электромагнитное поле резонатора Земля-ионосфера как фактор биорегуляции морских животных // Физиология морских животных: Сборник научных работ.– Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1989. – С. 89–90.
16. Степанюк И.А., Муравейко В.М. ЭМ-поле резонатора Земля-ионосфера как синхронизатор внутренней ритмики гидробионтов // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И.Вернадского. Серия «Биология. Химия».– 2002.– Т.15(54).– № 1.– С. 73-76.
17. Сочельников В.В. Основы теории естественного электромагнитного поля в море. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. – 216с.
18. Бондаренко Н.Ф., Гак Е.З. Электромагнитные явления в природных водах. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. – 152с.
19. Муравейко В.М. Электросенсорные системы животных. – Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1988.–110с.
20. Бычков В.С., Жмур В.В., Лапшин В.Б. Об электромагнитных эффектах при колебании заряженной поверхности моря// Геомагн. и аэроном. 1979. XIX. № 4. С. 762-764.
21. Броун Г.Р., Ильинский О.Б., Муравейко В.М., Горшков Э.С. Закономерность рецепции водными позвоночными действия магнитного поля Земли.– Открытие № 371.– Зарегистрировано в Государственном реестре открытий СССР.– Диплом от 20.01.92 г.

22. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Уральский УГЦ ГА, 2010. – 113с.
23. Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. – Киев: Наук. думка, 1992. – 188с.
24. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1974. – 574с.
25. Шидлаускайте Л.А. Реакции водных животных в электромагнитных полях.//Труды АН Литовской ССР. – 1973. – Сер. В, т.2. – С.127
26. Phillips J.B., Adler K. Directional and discriminatory responses of salamanders to weak magnetic fields. In: Animal Migration Navigation and homing. Springer-Verlag, Berlin, 1978. – P.325-333.
27. Keeton W.T. The oriental and navigational basis of the homing in birds// Adv. Study Behav. 1974. №5. P.47-132.
28. Симаков Ю.Г. Живые приборы. – М.: Знание, 1976. – 103с.
29. Kirschvink J.L. Birds, bees and magnetism: A new look at the old problem of magnetoreception//Trends Neurosci. 1982. Vol.5. P.160-167.
30. Степанюк И.А. Инфразвук: физика и биология//Физика. – 2007. – №1. – С.39-44.
31. Броун Г.Р., Ильинский О.Б., Муравейко В.М. и др. Восприятие электрорецепторами ампул Лоренцини акуловых рыб теллурических токов, обусловленных геомагнитными вариациями//Доклады АН СССР. – 1978. – Т.241, №5. – С.1228-1231.
32. Броун Г.Р., Ильинский О.Б., Муравейко В.М. и др. Восприятие электрорецепторами ампул Лоренцини электрических полей морских волн//Доклады АН СССР. – 1979. – Т.248, №1. – С.252-254.
33. Lissmann, H.W. and Machin, K.E., Electric Receptors in a Non-Electric Fish (Clarias), Nature, 1963, vol. 199, pp. 88–89.
34. Peters R.S., Buwalda R.J.A. Frequency response of the electroreceptors (“small pit organs”) of the catfish, *Ictalurus nebulosus* Les/J. comp. Physiol. – 1972, № 79. – P.29-38.

35. Степанюк И.А. и др. Влияние вариаций геомагнитного поля на двигательную активность рыб.//Итоговая сессия ученого совета РГГМИ: Тезисы докладов, Санкт-Петербург, 26-27 января 1995г. – СПб.: Изд.РГГМИ, 1995. – С.45-46.
36. Степанюк И.А., Зимин А.В., Лебедева И.К. Возмущения резонансного электромагнитного поля Земли и их влияние на биологические объекты//Итоговая сессия ученого совета РГГМУ: Тезисы докладов, Санкт-Петербург, 26-27 января 1999г. – СПб.: Изд. РГГМУ, 1999. – С.81-82.
37. Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А., Мартынюк В.С. Космическая погода и наша жизнь. – Фрязино: Век 2, 2004. – 224с.
38. Клейменова Н.Г., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации как один из экологических факторов // Биофизика. – 1992. – Т.37, №3. – С.429-437.
39. Дубов А.П. Геофизический фактор как синхронизатор биоритмов // Корреляции биологических и физико-химических процессов с космическими и гелио-физическими факторами: Тез. докл. / IV международный пушинский симпозиум, Пушкино московская область, сент. 1996 г. – Пушкино: Изд. ОИНТИ Пушкинского науч. центра РАН, 1996. – С.68.
40. Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А. Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу. – М.:Изд-во МНЭПУ, 2000. – 374с.
41. Нусенбаум Л.М., Фалеева Т.И. Исследование поведения рыб в электрическом поле. Изв. ГосНИОРХ, 1961. – Т. 52 , вып.1. – С. 93.
42. Данюлите Г.П. Некоторые особенности поведения салаки в однородном поле постоянного и импульсного токов.//Труды АН Литовской ССР. – 1963. – Сер. В, вып. 3/32. – С.181-194.
43. Нусенбаум Л.М. О поведении рыб в электрическом поле в связи с проблемой их охраны при гидростроительстве.//Труды Сов. по физиол. рыб – 1958. – С.132-142.
44. Lamarque P. Electrophysiologie du poisson soumis a l'action d'un champ electrique.//Applications de l'electricite a la biologie et a l'amenagement des peches continentales. – 1968. – P.87-116.

45. Малькявичус С.К., Данюлите Г.П., Самаркин А.А. О поведении некоторых морских рыб в электрических полях.//Всесоюз. конф. по вопросу изучения поведения рыб в связи с техникой и тактикой промысла. – Мурманск: ПИНРО, 1968. – С. 27-35.
46. Эйди У.Р. Частотные и энергетические окна при воздействии слабых электромагнитных полей на живую ткань.//Труды инженеров ин-та по электронике и радиотехнике. – 1980. – Вып. 68, №1. – С.140-148.
47. Степанюк И.А., Гаврилова О.Ю., Кочеткова Е.С. Проблема биологического предчувствия экстремальных космогеофизических событий.//Космогеофизические факторы экологии биосистем. – СПб.: Астерион, 2007. – С.23-31.
48. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М.: Энергия, 1968.– 488 с.
49. Степанюк И.А. Проблема мониторинга электромагнитных полей КНЧ-диапазона в тропосфере и гидросфере Земли. – СПб.: РГГМУ, 2014. – 204с.
50. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. – М.: Мысль, 1973. – 349с.
51. Чижевский А.Л. Космический пульс жизни. – М.: Мысль, 1995. – 767с.
52. Устройство для регистрации двигательной активности гидробионтов.: пат. 148670 Российская Федерация: МПК G01D 3/036/ Фролова Н.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет». – №2014100788/28; заявл. 10.01.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. №34. – 3с.
53. Волькенштейн М. В. Биофизика. – М.: Наука, 1981. – 575с.
54. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 670с.
55. Марчук В.И., Токарева С.В. Способы обнаружения аномальных значений при анализе нестационарных случайных процессов. – Шахты: ЮРГУЭС, 2009. – 209с.
56. Поляков К.В. Повышение надежности для одной из процедур обнаружения/К.В. Поляков, Р.Г. Толпарев//Радиотехника. – 1990. – №6. – С.57-59.

57. Голубков А.С. Отбраковка недостоверных результатов телеизмерений./А.С. Голубков, В.П. Коротаев//Метрология. – 1973. – №2. – С.10-18
58. Владимирова О.М. Восприятие камчатскими крабами переменных искусственных и естественных магнитных полей. – магистер. дисс.– СПб, 2013. Специальность 28.04.00–Прикладная гидрометеорология, 66с.
59. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.; введ. 2013–01–01. –М.: Стандартинформ, 2013. – 24с.
60. ГОСТ ИСО 11843-4–2005. Статистические методы. Способность обнаружения. Метод сравнения минимального обнаруживаемого значения с заданным значением.; введ. 2007–01–01. –М.: Стандартинформ, 2006. – 13с.
61. ГОСТ Р ИСО 11843-1–2007. Статистические методы. Способность обнаружения. Ч.1. Термины и определения.; введ. 2007–07–01. –М.: Стандартинформ, 2007. – 12с.
62. Шишкин И.Ф. Основы метрологии, стандартизации и контроля качества: Учеб. пособие. – Москва: Изд-во Стандартов, 1988. – 320с.
63. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987. – 295с.
64. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и применения//Успехи физических наук. – 1996. – Т.166, №11. – С.1145-1170.
65. Степанюк И.А., Баландина Н.Л., Комарова О.В. Влияние рН воды на поведенческую активность карповых рыб// Космогеофизические факторы экологии биосистем. – СПб.: Астерион, 2007. – С.51-57.
66. Степанюк И.А., Петрова М.Н., Фролова Н.С. Влияние космогеофизических факторов на поведение карповых рыб. Космогеофизические факторы экологии биосистем. – СПб.: Астерион, 2007. – С.42-50.
67. Зимин А.В., Баландина Н.Л., Грекова А.Н. Влияние космогеофизических факторов на промысел гидробионтов. Космогеофизические факторы экологии биосистем. – СПб.: Астерион, 2007. – С.71-83.

68. Степанюк И.А., Фролова Н.С. Возможности использования рыб в прогностических целях для предсказания опасных процессов в природе [Текст]. // Общество. Среда. Развитие.: Научно-теорет. журнал/ Гл. ред. В.Г. Егоркин – Спб.: ЦНИТ Астерион, 2011. – №3. – С.218-222.
69. Степанюк И.А., Псаломщиков В.Ф. Электромагнитные КНЧ-вариации, наблюдаемые при прохождении циклонов над морем // Моделирование и натурные гидрологические исследования морей: Сб. научн. трудов. – Спб., 1994. – С.181-186.
70. Степанюк И.А. Муравейко В.М. К вопросу о возможном механизме предчувствия морскими животными биологически важных геофизических явлений // Морфофизиологические аспекты изучения рыб и беспозвоночных Баренцева моря. – Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1982. – с.85-92.
71. Степанюк И.А. Восприятие естественных электромагнитных полей как основа механизма предчувствия приближения опасных гидрометеорологических процессов. // Атмосфера и здоровье человека: Тез. докладов./ Всероссийская конференция, С.-Петербург, 24-26 ноября 1998 г. — Спб.: Гидрометеиздат, 1998. – С.71-72.
72. Биогенный магнетит и магниторецепция. Пер. с англ. / Под ред. Дж. Киршвинка, Д. Джонса, Б. Мак-Фиддена. – М.: Мир, 1989. – 353с.
73. Биология и физиология камчатского краба побережья Баренцева моря / Отв. ред. Г.Г. Матишов; Мурман. мор. биол. ин-т КНЦ РАН. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008. – 168с.
74. Степанюк И.А., Муравейко В.М., Емелина А.В., Бехтева В.В. Особенности двигательной активности камчатских крабов. // Космогеофизические и гидрофизические факторы в морских технологиях. / Под ред. проф. И.А. Степанюка – Спб.: Астерион, 2008. – С.12-21.
75. Зенченко Т.А., Рехтина А.Г., Заславская Р.М., Фирсова Е.В. Метод исследования возможной связи параметров микроциркуляторного кровотока с особенностями геомагнитной обстановки // Космогеофизические факторы

- экологии биосистем. Сборник научных трудов.– СПб: Астерион, 2007. – С. 32-41.
76. Фролова Н.С., Степанюк И.А. Электромагнитные поля гидрометеорологических процессов как фактор экологии гидробионтов//Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU». – 2016. – № 35. – С.84-95.
77. Фролова Н.С., Степанюк И.А. Физические механизмы восприятия гидробионтами биологически важных гидрометеорологических процессов над водоёмами//Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU». – 2017. – № 43. – С.232-244.
78. Барановский Э.А., Тарашук В.П., Владимирский Б.М. Влияние солнечной активности и геофизической возмущенности на физико-химические процессы в жидкой среде: предварительный анализ показаний штормгласса//Геофизические процессы и биосфера, 2010. – Т.9. – №1.– С. 19-33.
79. Барановский Э.А., Тарашук В.П., Владимирский Б.М. Колба Фицроя (штормгласс) как индикатор погоды – земной и космической. Новые данные//Космос и биосфера: Тезисы докладов IX Международной крымской конференции, 10-15 октября, 2011, Алушта, Украина. – Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. – С. 113–114.
80. Устройство для регистрации изменчивости характеристик физико-химической системы штормгласса.: пат. 141806 Российская Федерация: МПК G01W 1/00/ Фролова Н.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет». – №2014100791/28; заявл. 10.01.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. №16. – 3с.
81. Степанюк И.А., **Фролова Н.С.**, Зимин А.В. Связь между характеристиками штормгласса и электромагнитными возмущениями [Текст]. // Морской вестник. – 2013. – №2(46). – С.91-92.

**Приложение А. Патент на полезную модель №148670 «Устройство для регистрации двигательной активности гидробионтов».**



**Приложение Б.** Патент на полезную модель №141806 «Устройство для регистрации изменчивости характеристик физико-химической системы штормгласса».



Nataliya Sergeevna Frolova

**Physical mechanisms of a presentiment of hydrometeorological processes by some  
types of hydrobionts**

25.00.28 – Oceanology

The thesis for a scientific degree competition

PhD in Physico-mathematical sciences

Supervisor:

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,

professor of the Department of Oceanology

Ivan Antonovich Stepanyuk

St Petersburg 2018

## CONTENTS

<b>Introduction</b> .....	147
<b>1 Review of the available physical data on perception and presentiment of some dangerous hydrometeorological processes</b> .....	156
1.1 Hydrometeorological processes as sources of extremely low-frequency band electromagnetic fields.....	156
1.1.1 Electromagnetic fields of waves and currents.....	156
1.1.2 Electromagnetic fields of the atmospheric surface layer over the sea.....	157
1.1.3 Electromagnetic fields of clouds.....	158
1.1.4 Electromagnetic fields of cyclones and frontal sections.....	160
1.2 Perception of dangerous processes by some types of hydrobionts.....	163
1.2.1 Review of bioelectric features of some hydrobionts.....	166
1.2.2 Catfishes are as the indicators of some dangerous geophysical processes.....	169
<b>2 Estimates of the probable mechanisms of perception and presentiment of some hydrometeorological processes by hydrobionts</b> .....	174
2.1 Electromagnetic fields of hydrometeorological processes are as the information sources for hydrobionts.....	174
2.2 Calculations of penetration of extremely low-frequency band electromagnetic fields in water.....	175
2.3 Probable mechanisms of hydrobionts' presentiment of changes in the hydrometeorological conditions of their environment.....	179
<b>3 Development of new technologies for carrying out of the physical experiments with some hydrobionts</b> .....	181
3.1 New experimental facilities for research.....	181
3.1.1 A facility for definition of catfish motion behavior under the influence of alternating electric fields.....	181
3.1.2 A facility for definition of catfish motion behavior under influence of alternating magnetic fields.....	182
3.1.3 The automated definition of motion behavior of carps and catfishes with the help of a video camera.....	183
3.1.4 Automatic method of registration of King crabs' motion behavior.....	186
3.2 Experimental methods.....	187
3.2.1 Similarity criteria of modeling of the influence of hydrometeorological processes' electromagnetic fields on some types of hydrobionts.....	188
3.3 Methods of processing of the obtained experimental data.....	196
3.3.1 Spectral and cross-spectral analyses.....	196
3.3.2 Estimates and the analysis of fractal dimensions of the studied processes.....	196
3.3.3 Methods of determination of hydrobionts' response to the influence of alternating electric and magnetic fields in the laboratory conditions.....	197
3.3.4 Wavelet-analysis.....	201
<b>4 Results of the experiments</b> .....	204

4.1 Carps.....	204
4.1.1 Daily variability of carps' motion behavior.....	204
4.1.2 Estimates of the relationship between the average means of motion behavior and geomagnetic disturbances.....	207
4.1.3 Evaluation of the relationship between the short-period rhythms of motion behavior and geomagnetic storms.....	212
4.1.4 Estimates of the relationship between motion behavior and oncoming of cyclones and frontal sections .....	214
4.2 Catfishes.....	220
4.2.1 Response of catfishes to hydrometeorological processes .....	220
4.2.2 Search of the mechanisms of catfishes' perception of some hydrometeorological processes. Sensitivity to alternating electric fields .....	228
4.2.3 Sensitivity of catfishes to alternating magnetic fields.....	230
4.3 King crabs.....	234
4.3.1 The influence of magnetic storms on King crabs' motion behavior. Effects of premonition .....	234
4.3.2 Effect of passing cyclones on King crabs' motion behavior.....	242
4.4 Delay time of reaction («latent period») during the influence of the alternating electric and magnetic fields on the hydrobionts.....	245
4.5 Search for mechanisms of premonition by influencing the physico-chemical processes. Experiments with a stormglass.....	252
4.5.1 Experimental facility.....	254
4.5.2 Results of the observations.....	256
<b>Conclusion</b> .....	261
<b>List of references</b> .....	263
<b>Appendix A</b> .....	270
<b>Appendix B</b> .....	271

## Introduction

Current development of fisheries and aquaculture farms makes the scientists consider finding different ways to improve their efficiency. In this regard, the methods of fishing are constantly being improved, as well as the quality of the forecast, taking into account hydrophysical, hydrochemical and other abiotic factors affecting fishing stocks.

Among abiotic factors, extremely low-frequency band electromagnetic fields, generated by various hydrometeorological processes, are very important. A formation of such fields is proved in a number of works (for example [1, 2, 3, 4]). However, their effects on the aquatic organisms' motion behavior are still poorly understood.

In the laboratory it has been found that natural electromagnetic fields are perceived by different types of hydrobionts and are, apparently, the only possible source of the most important information about changes in hydrometeorological conditions in the habitat. During the experiments the variability of electromagnetic fields corresponding to the natural variations was simulated. The result was a set of the specific reactions of a number of aquatic organisms to these electromagnetic fields – a sharp change in the motion behavior, changes in the natural rhythm, leaving the field action zone.

The influence of geomagnetic disturbances ("magnetic storms") on the eating and motion behavior of fish has also been studied. This effect is discussed in detail on the example of the trout in the source [5]. It is advisable to take this into account in the aquaculture and fishery technologies, and this will undoubtedly contribute to their efficiency. The research has shown that the sensitivity to electromagnetic fields may occur either through the perception of the electric component of the field or through the perception of the magnetic component. These components differ greatly from one to another in the extremely low-frequency band.

Perception of the electric component is observed only in animals with the special electroreception organs (sharks, catfishes, etc.) [6, 7, 8–11].

Other studied hydrobionts showed their direct perception of magnetic field variations (for example, carps).

In this work the most accessible species of the freshwater fish (catfish (*Corydoras aeneus*) and carp (*Cyprinus carpio* L.)) were selected as the objects of study in the experiments. King crabs (*Paralithodes camtschaticus*) were used for the experiments with marine hydrobionts. The main attention was paid to carps as the most popular types of hydrobionts in aquaculture. The magnetic induction values were used as an indicator of geomagnetic disturbances, and surface weather maps were also used to estimate the meteorological situation.

In order to understand in detail the behavior of hydrobionts and make the conclusions from a physical point of view, special facilities were developed and set. Then they have been patented.

*The main purpose of the research:*

The purpose of the research is to study the effects of perception and presentiment of some dangerous hydrometeorological processes by some freshwater and marine aquatic organisms and try to identify possible physical mechanisms of these effects.

*The tasks of the research:*

1. Analyzing the possibility of penetration of extremely low-frequency band electromagnetic fields, generated by some hydrometeorological processes, into the aquatic environment.

2. Developing the technologies of the long-term experiments (24 hours and more) with the groups of the fish in the laboratory conditions and creating new facilities for the automated measurements of motion behavior.

3. Studying the changes in carps' motion behavior during geomagnetic disturbances and obtaining some experimental dependences of fish behavior on the geomagnetic field induction variations.

4. Studying the variability of motion behavior of some freshwater fish species (carps, catfishes) during the biologically important hydrometeorological processes.

5. Studying the response of the freshwater hydrobionts (catfishes) to artificial alternating electric and magnetic fields of different frequencies.

6. Studying changes in the marine hydrobionts (King crabs) under variability of the geophysical and hydrometeorological processes.

7. Checking the hypotheses about perception and presentiment of the hydrometeorological processes (for example, storms) by the hydrobionts through the influence of the electromagnetic fields of these processes on the physico-chemical structures (by the example of a stormglass).

*The area of the research:*

The study was performed in the field corresponding to the specialty 25.00.28 – Oceanography: Chapter 6 – biological processes in the ocean and their relation with abiotic environmental factors and chapter 13 – evaluation methods of ecologically significant hydrophysical and hydrochemical characteristics of ocean water, optimal conditions for the existence of marine ecosystems, ocean resources protection from depletion and pollution, as well as chapter 9 of the specialty 25.00.27 – development of the theory and methodology of hydroecology, study of aquatic ecosystems, the theory of interaction of abiotic components with biotic ones of these systems, evaluation methods of environmentally significant hydrological and hydrochemical characteristics.

*The method of the research:*

A physico-experimental research method based on the representation of biological and physico-chemical systems as a "black box" with a normalized input signal and a recorded output reaction was used ([12]).

*The scientific novelty of the research:*

The following main results were obtained:

1. It is shown that the depth of extremely low-frequency band electromagnetic fields penetration into water (the thickness of the skin layer) for some sea basins is a few hundred meters, and for freshwater basins this value is up to 1 km or more.

2. New technologies of the long-term experiments (24 hours or more) for measurements of the fish groups' motion behavior in the laboratory conditions under

various hydrometeorological situations have been developed. The criteria of similarity for the simulation of hydrometeorological processes' electromagnetic fields' influence on the hydrobionts have been proposed and used.

3. Two special facilities for the experiments have been developed and used. Novelty of the technical solutions is confirmed by the patents of the Russian Federation.

4. A daily biological rhythm of the fish in quiet geophysical and hydrometeorological conditions has been determined on the results of the 34-hour experiment; these data were used for the detection of fish responses to hydrometeorological processes.

5. The dependence of fish average motion behavior on the intensity of geomagnetic disturbances. The maximum value of the correlation coefficient is «-0.8» for carps and «+0.87» for catfishes; various correlation coefficient's signs represent the opposite reaction of these fish to magnetic disturbances.

6. Using the methods of the fractal theory, it has been found that fish behavior is mainly deterministic; the decline in "chaos" is usually associated with fronts and cyclones during the experiments.

7. The intensity and time of fish reaction to the presentation of extremely low-frequency band artificial alternating electric and magnetic fields are experimentally revealed; the revealed extreme values of frequency dependences have been interpreted as physiological (breathing rhythm and heart rate) and geophysical (7-8 Hz area) areas.

8. The King crabs' responses to magnetic storms were experimentally determined. The effect of premonition of the magnetic storm beginning has been revealed.

9. The reactions of King crabs to cyclones were experimentally defined. The reactions are characterized by motion behavior intensification, that is, apparently, connected with crabs' desire to escape from the action zone.

10. In the experiments with the physico-chemical structure (stormglass) the hypothesis about the reaction of such structures to electromagnetic fields of some hydrometeorological processes (for example, cyclones) has been confirmed, that, in turn, leads to the confirmation of the idea of hydrobionts' sensitivity to magnetic fields through similar structures.

*The practical relevance of the research:*

1. The developed research technologies are currently implemented in the educational process at RSHU.

2. The results of the research will be used:

–in the project development of systems for monitoring marine and freshwater basins;

–in the development and operation of aquaculture systems;

–in the development of technologies to control aquatic organisms' behavior.

*Statements to be defended:*

1. New experimental facilities protected by the patents of the Russian Federation.

2. The defined physical laws of perception and presentiment of dangerous hydrometeorological processes by a number of freshwater aquatic organisms (carps and catfishes).

3. The defined physical laws of the effects of King crabs' perception and presentiment of some dangerous hydrometeorological processes.

4. The effects of the reactions of the biological analogue (the physico-chemical system of stormglass) to cyclones in comparison with the variability of electromagnetic fields of these cyclones.

*Validity of the results* is due to the well-developed technology of the experiments and a great number of self-obtained data processed with the use of the modern statistical methods.

*Approbation*

The results of the work were presented at the annual conference with the support from the Royal Meteorological Society (England, Exeter, 2011), The IX International Crimean Conference "Cosmos and biosphere" (Ukraine, Alushta, 2011), at the International Conference "Modern trends in theoretical and practical research" (Odessa, 2011), at the International Conference "The impact of space weather on human beings"

(Space Research Institute, Moscow, 2012), The V All-Russian Conference "Fish Behavior" (Borok, Russia, 2014), as well as at the Final Sessions of RSHU.

### *Publications*

#### **Publications according the directory of the State Commission for Academic Degrees and Titles:**

1. Stepanyuk I. A., Frolova N. S. Possibilities of using fish for prognostic purposes to predict dangerous processes in nature. *Society. Environment. Development.: Scientific Journal «TERRA HUMANA»*. 2011, no. 3, pp 218-222.

2. Stepanyuk I. A., Frolova N. S. Fish ability of presentiment of some dangerous hydrometeorological processes [Text]. //Morskoy Vestnik, 2012. – No. 1(41). pp. 61-63.

3. Stepanyuk I. A., Frolova N. S., Zimin A.V. The relationship between the stormglass characteristics and electromagnetic disturbances. *Morskoy Vestnik*, 2013, no. 2 (46), pp. 91-92.

4. Muraveiko, A. V., Stepanyuk I. A., Muraveiko V. M., Frolova N.S. The effects of electromagnetic fields influence on aquatic organisms' behavior in the area of "Shuman resonances". *Vestnik of MSTU*, 2013, vol. 16, no. 4, pp. 764-770.

#### **Other publications:**

5. Frolova N.S. Indication of dangerous geophysical processes with the hydrobionts' help. *Modern trends in theoretical and practical research: Proceedings of the International Conference*, 2011, vol. 31, pp. 56-61.

6. Stepanyuk I. A., Frolova N. S. Search of the predictive physical mechanisms of fish reactions on cosmogeophysical processes. *Space and biosphere: Proceedings of the IX International Crimean Conference*, 2011. Pp. 98.

7. Emelina A.V., Vladimirova O. M., Frolova N. S. Earth's magnetic field's influence on the Barents sea crabs' motion behavior. *Proceedings of the XXX anniversary conference of young scientists of Murmansk Institute devoted to the 150th anniversary of N. M. Knipovich "Problems of oceanography, biology and development of the Russian Arctic seas"*, 2012. Pp. 61-63.

8. Stepanyuk I. A., Frolova N.S. Zimin A. V., Perevozchikov N. F. Search of mechanisms of hydrometeorological processes' influence on the stormglass [Electronic resource]. *Impact of space weather on human beings: proceedings of the international conference, 4-8 June, 2012, Moscow, Space Research Institute, 2013, vol. 2, pp. 739-745.* Available at: [www.iki.rssi.ru/books/2013breus2.pdf](http://www.iki.rssi.ru/books/2013breus2.pdf).
9. Frolova N. S. Changes of hydrobionts' behavior in the conditions of hydrometeorological and geophysical electromagnetic fields' action. *Proceedings of the V All-Russian Conference, 2014. Pp. 273-281.*
10. Stepanyuk I. A., Zimin A.V., Frolova N. S. Electromagnetic fields; influence on the stormglass physico-chemical structure. *The problem of extremely low-frequency band electromagnetic fields monitoring in the Earth's troposphere and hydrosphere, 2014. Pp. 132-136.*
11. Frolova N.S. The facility for registration of variability of the stormglass physico-chemical system characteristics. Patent RF, no. 141806, 2014.
12. Frolova N.S. The facility for registration of hydrobionts' motion behavior: Patent RF, no. 148670, 2014.
13. Stepanyuk I. A., Frolova N. S. Electromagnetic fields of hydrometeorological processes are as an ecological hydrobionts' factors. *Electronic scientific journal "SCI-ARTICLE.RU", 2016, no. 35, pp. 84-95.*
14. Stepanyuk I. A., Frolova N., Muraveiko, V. M., Emelina, A.V., Vladimirova O. M. Response of the crab *PARALITHODES CAMTCHATICUS* (Tilesius, 1815) to cyclones. *Electronic scientific journal "SCI-ARTICLE.RU, 2016, no. 35, pp. 96-100.*
15. Stepanyuk I. A., Frolova N.S., Muraveiko V. M., Emelina A.V., Stroganova O. A. The Barents sea mussels' perception of alternating magnetic field. *Electronic scientific journal "SCI-ARTICLE.RU, 2016, no. 35, pp. 126-132.*
16. Stepanyuk I. A., Frolova N.S., Muraveiko, V. M., Emelina, A.V., Stroganova O. A., Levachev N.A. The Barents sea mussels' behavior under the laboratory experiment conditions. *Electronic scientific journal "SCI-ARTICLE.RU", 2016, no. 37, pp. 11-18.*
17. Stepanyuk I. A., Frolova N.S., Muraveiko V. M., Emelina, A.V., Trifonova O. S. Geomagnetic disturbances and the Barents sea hydrobionts' catch (by the example of

salmon and cod). *Electronic scientific journal "SCI-ARTICLE.RU"*, 2016, no. 37, pp. 162-172.

18. Stepanyuk I. A., Frolova N.S., Zimin A. V., Hotchenkov S. V., Nesterova (Trunina) T. V. The ability to control aquatic organisms' behavior through the use of extremely low-frequency band electromagnetic fields. *Electronic scientific journal "SCI-ARTICLE.RU"*, 2016, no. 37, pp. 188-196.

19. Stepanyuk I. A., Frolova N. S. Physical mechanisms of hydrobionts' perception of biologically important hydrometeorological processes over natural basins. *Electronic scientific journal "SCI-ARTICLE.RU"*, 2017, no. 43, pp. 232-244.

### *The structure of the thesis*

The thesis consists of introduction, four sections and conclusion. The volume of the thesis is 128 pages, including 90 figures, 5 tables and 2 appendices. The list of references contains 81 items.

**The introduction** shows the relevance of the topic, outlines the main purpose and the tasks of the research, reflects the scientific novelty and practical relevance of the work, as well as the methods of the research and the statements that are to be defended.

**Section 1** gives an overview of the available data on perception and presentiment of dangerous hydrometeorological processes by some types of hydrobionts. The question of possible mechanisms of presentiment is separately considered. In recent years a great number of scientific works have appeared on various problems of animals' presentiment. However, no detailed information is so far available on the phenomenon.

In **Subsection 1.1** hydrometeorological processes that generate extremely low-frequency band fields and can be the sources of information for hydrobionts are considered. The main electromagnetic fields are divided on electromagnetic fields of waves and currents, fields of convective clouds in the zones of frontal sections. Alternating electromagnetic fields caused by geomagnetic field disturbances are also considered

**Section 2** describes the most possible mechanisms of hydrobiont's perception and presentiment of hydrometeorological processes.

In **Subsection 2.1** the choice of electromagnetic fields of the atmospheric surface layer over the sea and electromagnetic fields of cyclones and frontal sections as the most possible sources of information for hydrobionts is proved.

**Subsection 2.2** deals with the calculations of penetration of extremely low-frequency band electromagnetic fields in water. The main interest of our tasks is hydrometeorological processes' electromagnetic fields at frequencies 0.1-2 Hz and 6-8 Hz.

In **Subsection 2.3** we discuss search of the mechanisms of living beings' perception of some hydrometeorological processes.

In **Section 3** the description of special facilities for conducting the experiments with fishes and crabs is given, also the method of carrying out the experiments and data processing is explained. One of the facilities has been patented.

**Subsection 3.1** describes the experimental facilities used to determine motion behavior of catfishes, carps and crabs.

**Subsection 3.2** reviews the experimental methods and the similarity criteria of modeling of the influence of hydrometeorological processes' electromagnetic fields on some types of hydrobionts.

**Subsection 3.3** is devoted to methods of processing and analysis of the obtained experimental data.

**Section 4** presents the results of the research.

**Subsection 4.1** describes the main results of the experiments with carps.

**Subsection 4.2** reviews the results of the experiments with catfishes. Special attention is paid to the reaction of catfishes to hydrometeorological processes.

In **Subsection 4.3** we describe the results of the experiments with king crabs.

**Subsection 4.4** is devoted to delay time of reaction («latent period») during the influence of the alternating electric and magnetic fields on the hydrobionts.

**Subsection 4.5** describes search of mechanisms of hydrobionts' presentiment of some dangerous hydrometeorological processes through the experiments with one of unbalanced physico-chemical systems. As a model of such systems a stormglass was used. This system was well known among seafarers in ancient times.

In **Conclusion**, the main results of the work are formulated.

# **1 Review of the available physical data on perception and presentiment of some dangerous hydrometeorological processes**

## **1.1 Hydrometeorological processes as sources of extremely low-frequency band electromagnetic fields**

This subsection of the thesis deals with the main hydrometeorological processes that generate extremely low-frequency band electromagnetic fields, providing local "pumping" energy into the global Earth's electromagnetic field, and could be the sources of information about these processes for hydrobionts. The informative properties of these fields were considered in a number of known works (for example [1, 2, 13-16], etc.)

### **1.1.1 Electromagnetic fields of waves and currents**

Electromagnetic background in seawater basins is rather complex. When salty ocean water flows through the Earth's magnetic field, an electric current is generated and this, in turn, induces a magnetic response as a secondary magnetic field [3]. The magnitude of these fields is determined by the Earth's magnetic field intensity, flow velocity and water conductivity. Such fields are called magnetohydrodynamic fields. The main sources of magnetohydrodynamic fields are wind and swell waves, tides and currents.

The intensity of magnetohydrodynamic fields, generated by sea waves, depends on their height, period, length and conductivity of bottom layer for shallow water. The intensity of fields, generated by waves, increases with increase in wave heights and periods, but with increase in depth it decreases. At a depth level equal to half of the wavelength, the amplitude of the magnetic field decreases 23 times in comparison with its value on the surface [3, 17].

The period of magnetohydrodynamic fields' fluctuations, connected with ocean currents, coincides with the periods of the currents. Ocean currents generate fields of 100  $\mu\text{V}/\text{m}$  (microvolt per meter) intensity. These fields also depend on the depth of current propagation [3]. It should be noted that the recorded electric and magnetic fields have a

well-defined amplitude and frequency relationship with the dynamic characteristics of water flow and reflect its structure [18]. In work [19] it is noted that electrosensitive hydrobionts can use generated electric fields for search of ways of movement during migration, and also for orientation during daily moving. In addition, electric fields, generated by waves, can be a source of information on the state of sea.

However, we should take into account that magnetohydrodynamic fields decrease with distance. So these fields cannot explain the high lead-time of aquatic organisms' presentiment of dangerous hydrometeorological processes.

### 1.1.2 Electromagnetic fields of the atmospheric surface layer over the sea

Two main reasons of electromagnetic fields' generation are:

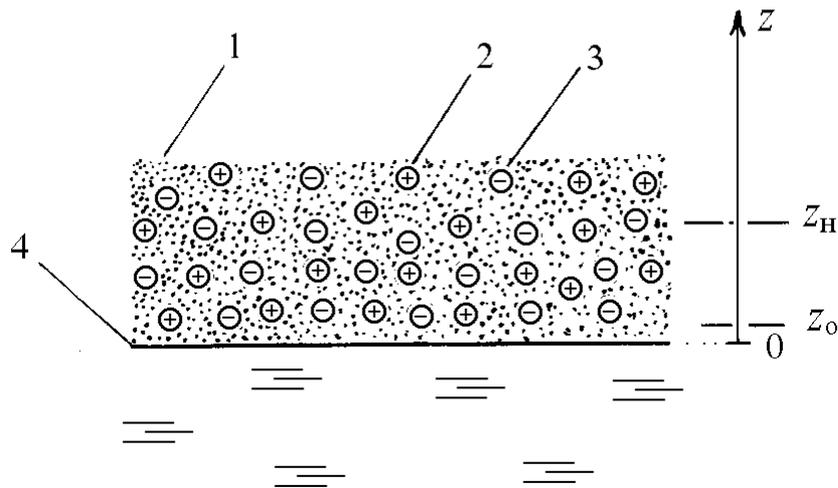
- charging of the sea surface by distributed charges, formed by magnetohydrodynamic fields [20];
- the fact that there are a great number of air ions, which are electrically charged aerosols, moving under the influence of waves [1, 3].

The first mechanism, described in the work [20], is probably less important for hydrobionts than electric fields of waves and magnetic induction fields, generated by them. The influence of these fields on hydrobionts has been established in the work [21] and the following studies of these authors.

The second mechanism can be considered as aerophysical. Generated electromagnetic fields above sea surface are described in this research. They can be registered both in the atmosphere and water. Electromagnetic fields, generated by movement of air ions, are the matter of the most interest to the research [1].

In fact, air ions are the particles that include both positive and negative ions. So a structure that consists of air ions is formed in the atmospheric surface layer over the sea. There is a constant release of air ions into the air, followed by their next setting on the sea surface, under the conditions of waves.

The model of the atmospheric surface layer over the sea is put in the picture 1.1.



Picture 1.1 – The model of the atmospheric surface layer over the sea. 1 – neutral air area, 2 – positive air ions, 3 – negative air ions, 4 – sea surface. The data are taken from the work [1].

The presence of turbulent processes in such area during storms generates amplitude-modulated electromagnetic fields, which are registered both by electric and magnetic components. It is important to notice that the carrier frequencies are most marked in the 4-12 Hz range with an energy mode of 6-8 Hz. And this mode coincides with the first mode of Schumann resonances. By analogy with «infrasonic sound of the sea» discovered by V.V. Shuleikin, electromagnetic fields of the surface layer during storms can be considered as «electromagnetic sound of the sea». At the same time electromagnetic fields at these frequencies can spread over very long distances and penetrate into water to a depth of more than 100 m, which makes it possible for hydrobionts to obtain some predictive information on approaching storms.

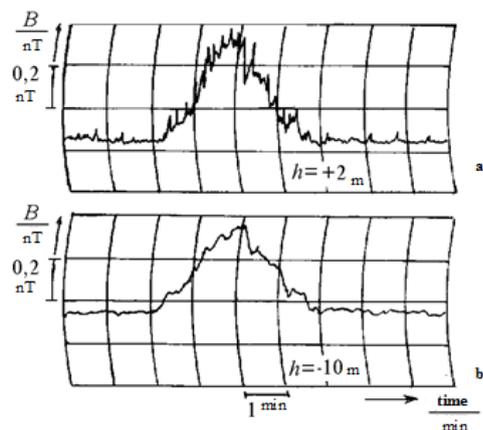
### 1.1.3 Electromagnetic fields of clouds

Convective processes in the troposphere are one of the most important sources of extremely low-frequency electromagnetic fields. Convective structures have a strong turbulence that is expressed most strongly in cumulus and cumulonimbus clouds. There is

a gradual accumulation of charges in convective clouds during their development. Alternating electromagnetic field is formed by turbulent processes in clouds. If very fast turbulent pulsations exist, an amplitude-modulated electromagnetic field appears, where the carrier frequency is a frequency of «fast» pulsations, and the modulation frequency is the initial electromagnetic field. The energy of generated field is mainly concentrated in the area between cloud and its shadow. In other words, electromagnetic fields of clouds can be registered only directly under clouds.

So the considered process resembles what happens in the atmospheric surface layer. Thus, it is possible to define this process as electromagnetic «sound of cloud».

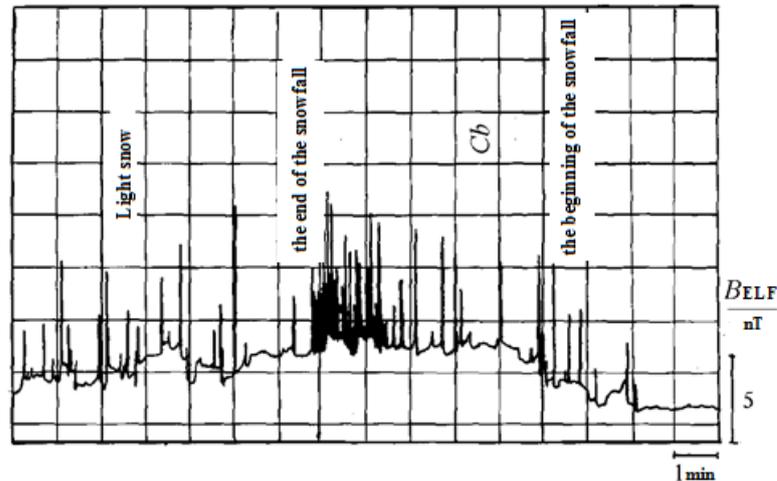
The example of registration of such electromagnetic field is shown in the picture 1.2, which shows that high-frequency pulsations, displayed in the surface channel, are filtered with a water layer, and at a depth of 10 m the record becomes smoothed.



Picture 1.2 – Amplitude-modulated electromagnetic field while a small cumulus cloud is passing through the observation point. The data are taken from the work [1].

The situation changes considerably with precipitation that contains charged particles flying down. In general, precipitation, negatively charged, transfers their charge downwards, and light atmospheric ions, cloud drops and crystals, positively charged, are transported upwards with the rising flow of air.

A lot of pulse signals are registered as a result of precipitation, and a mean signal from a cloud decreases. The example of passage of cumulonimbus cloud accompanied by snowfall is shown in the picture 1.3 from the work [1].



Picture 1.3 – Record of electromagnetic field of cumulonimbus cloud during snowfall. The data are taken from the work [1].

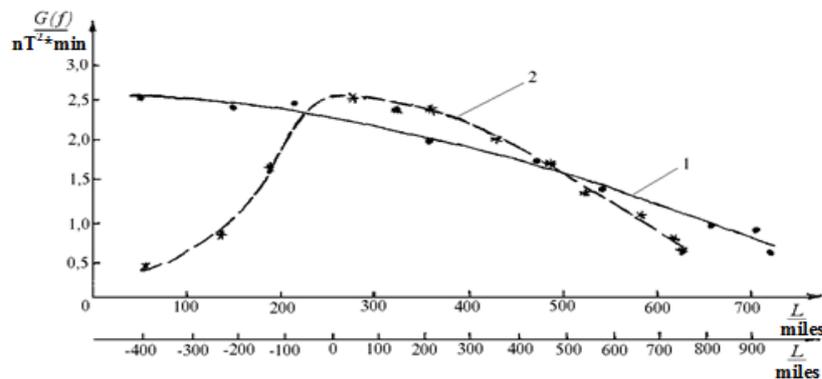
#### 1.1.4 Electromagnetic fields of cyclones and frontal sections

In general, cyclones usually contain fronts in their structure. Typical fronts include warm fronts, cold fronts, occlusion fronts, in other words, partially closed warm and cold fronts, and secondary fronts that appear in unstable cold air masses due to inhomogeneous heating of their underlying surface in a rear part of the cyclone. There are partly cloudy, cumulus and cumulonimbus clouds with intermittent precipitation and gusty wind in a rear part of the cyclone [22].

Frontal sections follow cyclones, and they also go along troughs. In both cases, frontal sections always contain cloud structures, and at the same time low-frequency electromagnetic fields are necessarily generated. Of course, there are some special aspects in comparison with typical cloud fields discussed earlier. So, fluctuations, generated in frontal sections, are not only electromagnetic fields, but usual fluctuations, which are called internal gravity waves. As internal gravity waves propagate mainly along

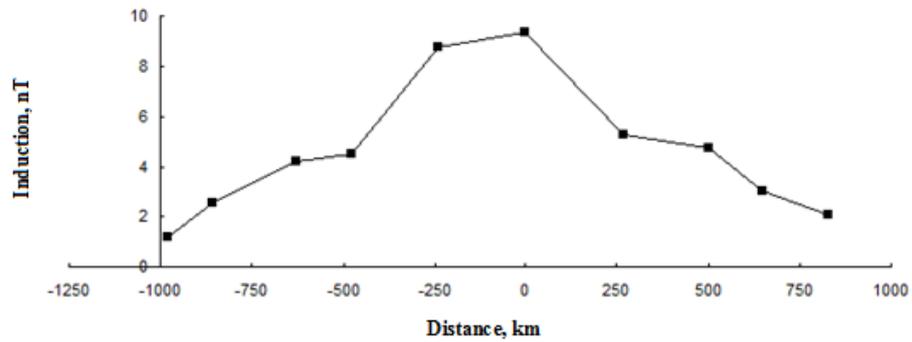
boundaries of the section in any stratified area, they are concentrated in the cyclone center. In the cyclone center internal gravity waves are transformed into infrasound, which represents longitudinal fluctuations. And it is these infrasonic longitudinal fluctuations that go up the "tube" of the cyclone axis. Their amplitude increases due to decrease in density with height. As a result, fluctuations influence the lower boundary of the ionosphere, in other words, there are transverse fluctuations with periods of internal gravity waves (5-20 min). Thus, generated amplitude-modulated electromagnetic fluctuations are formed.

The characteristics of distribution of such electromagnetic signals' power depending on the distance to the cyclone center are shown in picture 1.4, borrowed from the work [1]. The asymmetric nature of the distribution has been revealed here – in the direction of the cyclone movement (ahead of the center) power is significantly higher than at the same distances in the cyclone rear part. That is, the directional character of generated field is formed.



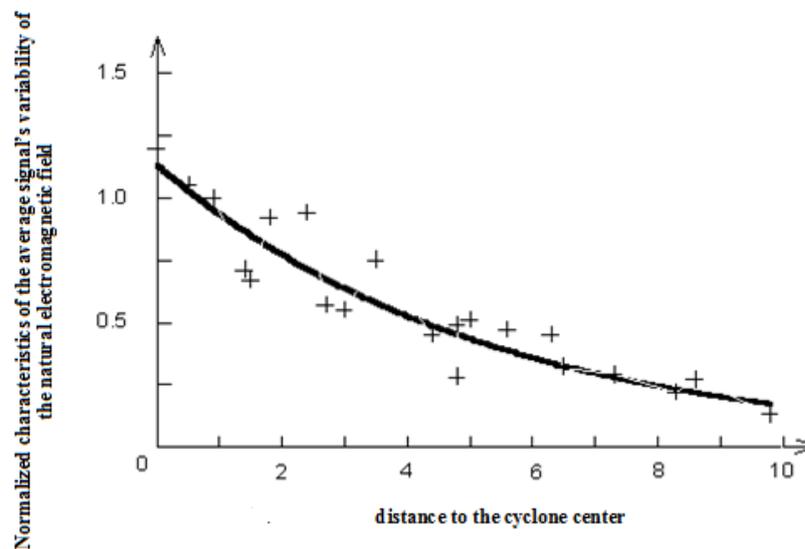
Picture 1.4 – Variation of the modulating variations' power with periods of internal gravity waves during the passage of the cyclone  
1 – variability when the cyclone approaches; 2 –full variability (900 miles to 400 miles). The data are taken from the work [1].

In the source [2] electromagnetic fields of cyclones in the frequency area of 6-8 Hz were studied. Amplitude modulation by internal gravity waves' fluctuations wasn't considered there. In contrast to the modulated fields from the work [1], there is a non-directional character of the generated field (Picture 1.5).



Picture 1.5 – The dependence of changes in the average value of electromagnetic field’s induction at frequencies of 6-8 Hz on the distance to the cyclone center. The data are from the work [2].

Estimates of electromagnetic fields’ variability at frequencies of 6-8 Hz, made for different versions of cyclone movement in the work [2], are shown in picture 1.6. Here the characteristics are normalized to a distance of 100 km from the center of cyclone.



Picture 1.6 – Normalized characteristics of the average signal’s variability of the natural electromagnetic field at frequencies of 6-8 Hz according to the regression model from the work [2].

The considered features of natural electromagnetic fields related to cyclones are very important for hydrobionts and described in detail in the thesis section 4.2.1. Some experimental studies are needed to identify certain mechanisms of presentiment of natural electromagnetic fields, generated during hydrometeorological processes, by hydrobionts. However, it should be said that during the laboratory experiments on modeling of artificial electromagnetic fields, it is necessary to take into account and exclude from the results the influence of extremely low-frequency band natural electromagnetic fields, which are generated during various hydrometeorological processes.

## 1.2 Perception of dangerous processes by some types of hydrobionts

At the present time, scientists around the world are interested in a study of even, at first glance, the most trivial facts of unusual animal behavior before such dangerous phenomena as earthquakes, tsunamis, hurricanes, sea storms, etc. It is only known that some animals possess a very effective mechanism for presentiment of dangerous processes, but the mechanisms of such feeling are still unclear.

It is known that some living organisms are more sensitive to electromagnetic fields than humans [23]. The high sensitivity of many animals to electromagnetic fields is evidenced by the use of the Earth's geomagnetic field as a marker. This ability is found in many living organisms: protozoans, insects, crustaceans, reptiles, fish, birds, etc. (for example, [24, 25, 26, 27]). Moreover, many animals use electromagnetic fields for distance communication, which provides the coordinated movement of flocks of fish and birds. And this is also observed in herds of mammals and clusters of insects [28, 29].

In some sources (for example, [19]) presentiment of hydrometeorological processes by many aquatic organisms is considered. In particular, presentiment has been detected in jellyfish. The mechanism of perception of some storm harbingers is also described there, in particular infrasonic vibrations generated in the surface layer by the interaction between wind and waves («infrasonic sound of the sea») are detailed. This effect is described by V. V. Shuleikin in early editions of "Physics of the sea".

However, in relation to jellyfish, there is a natural doubt that they could perceive such a harbinger as infrasound. Infrasound is really generated under stormy conditions in the air (for example [30]), but in this case jellyfish should perceive it with their umbrella, if they are on the surface. However, there are no elements in the umbrella that are sensitive to infrasound. And jellyfish don't always live on the surface. Quite often the location of jellyfish is at depths of 1-1.5 m. It is assumed in the available literature that the perception is provided by specific formations on tentacles. But all this is unlikely due to specificity of sound penetration into water.

There is a hypothesis about reaction of jellyfish to changes in atmospheric pressure, which are formed before storm coming. These changes do exist, but they are small, in fact 10-20 hPa. This value is equivalent to the thickness of the water layer of 10-20 cm. In case of sea waves it is unlikely to expect any reaction from jellyfish.

Thus, the task of finding other working factors related to sea storms appears.

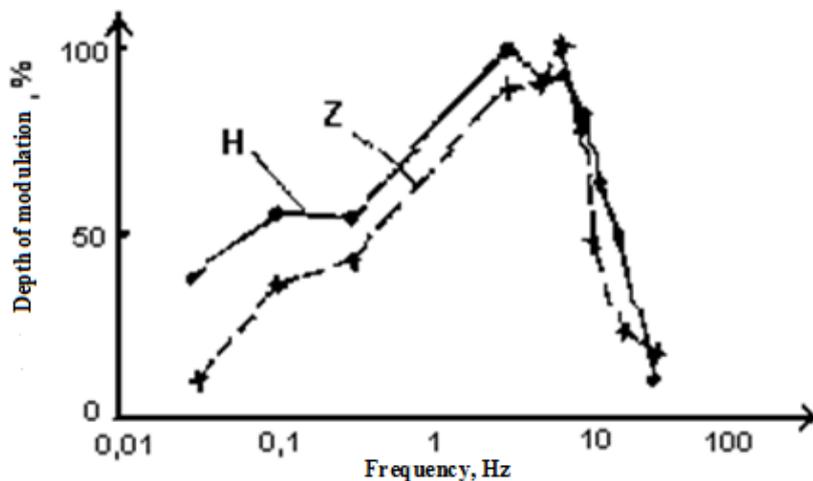
Nowadays, the problem of finding the mechanism of premonition among some types of hydrobionts is very popular. In general, we can say that different studies in this area are very important, as a man does not have a sufficiently accurate mechanism for predicting dangerous events. This is particularly true for tsunami, which is of the greatest interest to ocean scientists. Tsunamis are the result of earthquakes, and seismic harbingers have a low advance time.

Many scientists have expressed different hypotheses about possible mechanisms of presentiment of earthquakes and tsunamis, but today a convincing experimental evidence of these hypotheses doesn't exist. Now assumptions connected with perception of natural electric and magnetic fields by animals are of most interest to researchers.

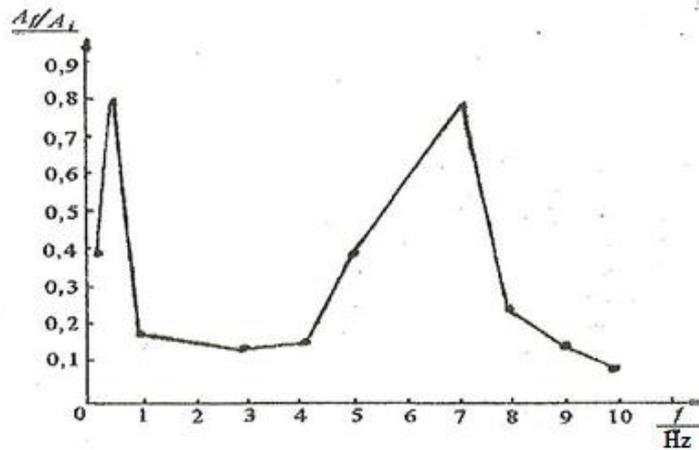
For example, many experiments have shown that the Barents sea rays *Raja radiata* are capable to perceive such weak electric fields in water, which are generated by geophysical sources (magnetic storms and sea waves) at frequencies less than 2 Hz [11, 31, 32]. Of course, it may be assumed that such perception of magnetic storms is a consequence of high electrical sensitivity of this type of hydrobionts. However, perception of magnetic storms, accompanied by changes in hydrobionts' behavior, is also found in carps, which fit into a group of not electrosensitive aquatic organisms. The almost

complete lack of electrosensitivity doesn't prevent carps from their reaction to alternating magnetic fields about units of nT during prolonged exposure and tens of nT immediately after the beginning of exposure [33].

It is known that some types of catfishes (Japanese dwarf catfish, Turkestan catfish) predict some processes, such as storms, tsunamis, earthquakes. People can learn about their coming by watching the hydrobionts' behavior. The maximum sensitivity of catfishes in the 7-8 Hz area has been discovered (Picture 1.7) [34]. These frequencies are the main mode of "Schumann resonances" of the Earth-ionosphere waveguide. In this regard, the results for the frequency characteristics of "pure" magnetosensitivity of carps are very interesting (Picture 1.8), especially the presence of two main peaks of sensitivity – in the sphere of physiological frequencies and in the frequency area of 6-8 Hz, which can be determined as a geophysical area [35, 36].



Picture 1.7 – The sensitivity of catfishes to horizontal (H) and vertical (Z) electric fields.



Picture 1.8 – The sensitivity of carps to alternating magnetic fields of different frequencies.

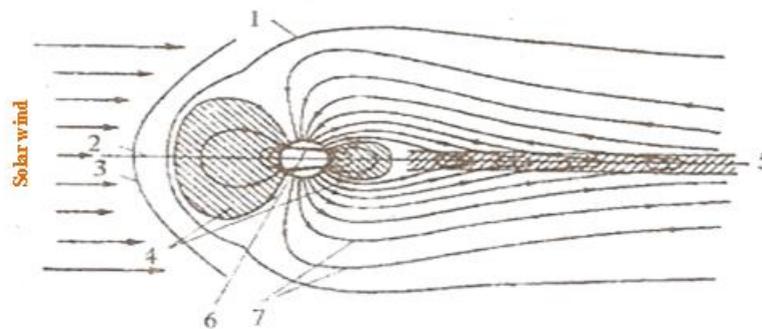
### 1.2.1 Review of bioelectric features of some hydrobionts

The class of fish includes more than 20 thousand species [6]. Consequently, different fishes have different ways of information transfer during their communication; feeding, weapon and reproduction. At this time, scientists have discovered six channels of fish communication: optical, acoustic, hydro-mechanical, chemical, light and electric channels. It is important to add that all fish can transmit signals through contact that means through touching. An electric channel plays a special role in the life of fish. Almost all fish are able to emit and perceive electric fields. Depending on electric sensitivity all fish can be divided into three groups: highly sensitive species with electric receptor organs; weakly electric species with special electric generating tissues; non-electric fish, in other words, all the rest.

It has been established now that natural electric fields in the seas and oceans can reach values comparable to fish sensitivity. Consequently, it is necessary to have not only measurements of background, but also have ideas about sources of the background, factors that determine its nature and characteristics in the area at this time, as well as about physical phenomena that correlate with changes in the background level in order to be able to correlate the behavior of aquatic organisms with the character of the natural electromagnetic background in water.

Electromagnetic background in water is quite complex. It is determined by physical, chemical and biological processes. In natural electromagnetic background the following components are distinguished: constant magnetic field of the Earth and its variations, geomagnetic pulsations. The induction of the stationary magnetic field of the Earth has the average values of 50 000 nT. Geographical anomalies and temporal variability (variations) are typical for the Earth's magnetic field. Quiet and perturbed variations are distinguished. The quiet variations include: solar-daily, lunar-daily and annual variations. In addition to the considered periodic variations, for the Earth's magnetic field is also characterized by non-periodic variability, which is defined as magnetic storms.

Geomagnetic pulsations are generated against the backdrop of the Earth's magnetic field's variations. Variability of the Earth's magnetic field with frequencies less than 3 Hz is called the pulsations. Variations at higher frequencies are referred to alternating electromagnetic field. Geomagnetic pulsations are generated by the interaction of solar radiation with the Earth's magnetosphere (Picture 1.9). The duration of pulsations varies from a few minutes to several hours during the day, and the amplitude can range from 0.1 nT to 10 nT.



Picture 1.9 – The scheme of interaction of solar radiation with the Earth's magnetosphere  
(for example, from [1])

1-magnetopause, 2-geomagnetic equator, 3-shock wave, 4-areas of captured radiation, 5-neutral layer, 6-zone of polar lights, 7-magnetic lines of force.

Variability of the Earth's magnetic field and geomagnetic pulsations (geomagnetic activity) is estimated by generalized indexes. The most popular indexes are the total planetary index Kp and the local index K [37].

Magnetic storms are disturbances with amplitude greater than 50 nT. The intensity of the storm is usually estimated by the intensity and nature of the formed Sunspots. However, not only does the intensity of the magnetic storm have biological significance, but the magnetic storm's spectral composition also has it [38, 39].

In addition to disturbances of the Earth's magnetic field, should be separately identified magnetic perturbations connected with the change of the Interplanetary magnetic field's sign [40] Although the magnitude of these perturbations is small, the change of the Interplanetary Magnetic Field's sign, apparently, is an indicator of other factors affecting biological objects and the source of their perturbations is the Sun.

As a result of the Earth's magnetic field's disturbances, rather significant electric fields and currents, called telluric, are formed in the hydrosphere. [3, 4]. In other words, in hydrosphere it is necessary to consider not only alternating magnetic field, but also alternating electric field.

Fish perceive electric field of direct current in the form of orientation motion behavior. With increasing field strength a defensive reaction begins: fish are very excited, which is reflected in jerking of their body, fins, head, and try to leave the field action zone. If the field strength is increased further, the anodic reaction will begin – fish will move to the anode. With further increase in the field strength, there will be electroanesthesia when fish lose their balance and stop reacting to external stimuli. The subsequent increase of the field strength leads to the death of fish. This schematic reaction of fish in field of direct current is described in a number of papers, for example, [41, 42].

Fish react to electric fields of alternating current in a bit different way: the first two stages are almost the same, and with further increase in the field strength the stage of oscillotaxis begins – fish are located across the current lines. Further increase in the field strength causes electroanesthesia. Alternating current excites fish stronger than direct current. After alternating current action fish can't come to a normal state for a long time. Similar reactions were described in [42, 43, 44].

Fish behavior is much more difficult in the fields of pulse current. Fish reactions depend on the frequency, amplitude, shape and duration of pulses. In this regard, the study of fish reaction to pulse current is much more difficult. Different types of fish react to pulsed fields in different ways, but in general the stages of their reactions repeat the stages under the action of fields of direct current. The main difference from direct current is that innervation and inhibition are more expressed in this case [43, 45].

Summing up the above, it should be noted that the reaction of fish to weak and strong electric fields are different. So weak electric field could be used by fish for orientation and communication, and strong electric fields make the reaction of fish be unconditional-reflex.

The observed differences have given an idea that amplitude "windows" of sensitivity exist (for example, [46]). This is a matter of interest, and a desire to test the idea experimentally appears (see later in this research, section 4.2.2).

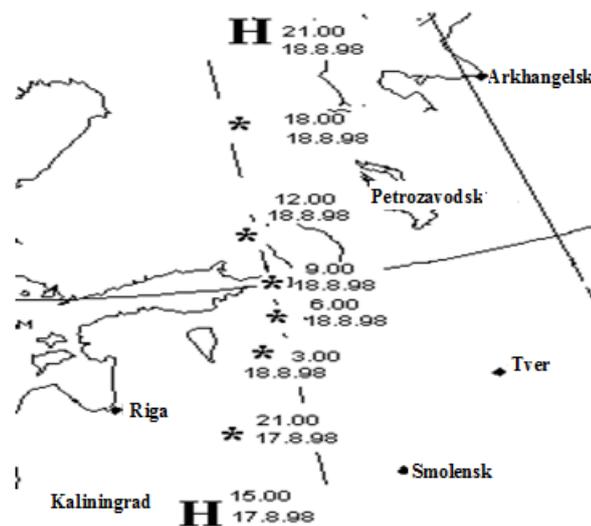
### 1.2.2 Catfishes are as the indicators of some dangerous geophysical processes

Nowadays it is known that certain types of catfishes, in particular Japanese dwarf and Turkestan catfish, change their behavior, waiting for such phenomena as storm, tsunami, earthquake, namely, they become very excited [19]. It is also known that before earthquakes and tsunamis and during cyclones with frontal sections, sharp changes in the characteristics of natural electromagnetic fields begin, including the area of extremely low frequencies specific to geomagnetic and geophysical disturbances [1].

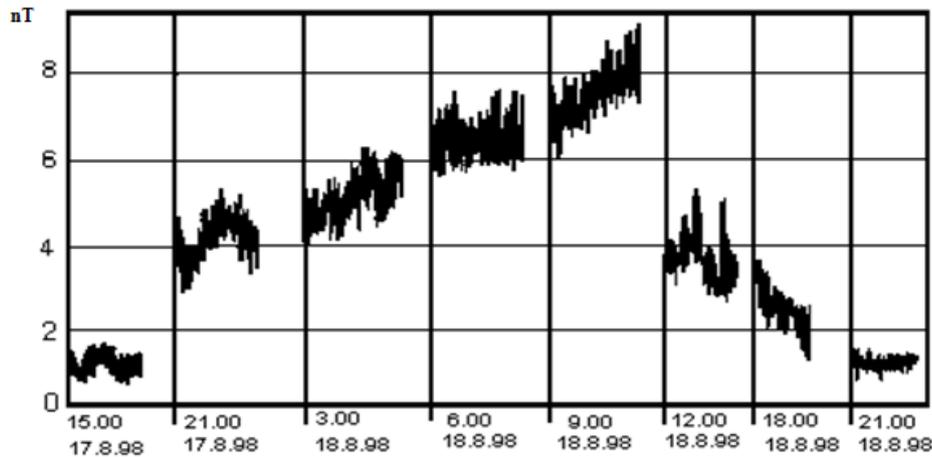
During the experiments with catfishes a maximum of catfishes' electrical sensitivity has been observed in the area of 7-8 Hz. As already mentioned in the paper, it is frequency range of 7-8 Hz that is connected with the concept of "Schumann resonances" in the area between the Earth's surface and the lower boundary of the ionosphere. And this is the area where electromagnetic field disturbances spread; they are caused by electrophysical phenomena connected with dangerous hydrometeorological and geophysical processes. In other words, in the situation of presentiment of oncoming of dangerous hydrometeorological events, the probable mechanism seems to be more related to

electromagnetic fields generated in the system of cyclones or separate fronts [1]. The mechanisms of these fields' generation are mainly connected with turbulent processes in clouds and transformation of acoustic infrasonic radiation of a cyclone into electromagnetic fields in the lower layers of the ionosphere, and in the case of propagation over the sea – also with electrophysical processes in the atmospheric surface layer where wind interacts with the excited sea surface [3].

A detailed study of relationships between disturbance characteristics of natural electromagnetic fields and oncoming of cyclones, as well as single frontal sections, was conducted in the work [2]. In this work six cases of oncoming of cyclones and two cases of oncoming of separate frontal sections near St. Petersburg were selected. Series realization, selected for the review, ranged from 1 to 3 days. Synoptic situations during standard meteorological periods for the selected cases were compared with the data on electromagnetic fields. An example of this comparison is shown in pictures 1.10 and 1.11.



Picture 1.10 – The scheme of a single cyclone movement from the south from Kiev to St. Petersburg and then through Finland to the north (asterisks indicate the location of the cyclone center in the standard synoptic terms). The data are taken from the work [2].



Picture 1.11 – Variations of the natural electromagnetic field during oncoming of a single cyclone in St. Petersburg. The data are taken from the work [2].

Picture 1.11 shows the 20-minute recording of the natural electromagnetic field, the middle of which corresponds to the synoptic terms when the location of cyclone center is marked. When the flat pressure gradient is in the point of observation (it is the cyclone center south of Smolensk), a rather "quiet" background level of the natural electromagnetic field is registered (time: 16:00 17.08.98, picture 1.11). In the situation of the cyclone coming to St. Petersburg, starting with the distance from its center of about 600 km, the increase of the signal level combined with periodic variations was observed. The maximum level of the natural electromagnetic field was observed during oncoming of cyclone in the area of the city, and the signal was weakened by the removing of cyclone.

The increase in the level of the natural electromagnetic field with oncoming of cyclone was observed, regardless of baric system's general direction of movement. Two of six cases, considered in the work [2], corresponded to the cyclone movement from the west to the east, three – from the south-west to the north-east, one – from the south to the north. In addition, this relationship was observed regardless of the season: three of the considered cases were observed in the summer, two – in the autumn and one – in the winter. There wasn't also any correlation between the pressure in the cyclone center and the recorded level of the natural electromagnetic field.

However, it is noted in the work [2] that the rise of the average level of the recorded fields at the same distances from the cyclone center to the observation point was 0.5-1 nT less in the case of the cyclones coming from the south in comparison with coming from the west and the south-west ones. The cyclones passing over the sea cause storms, as a result of which additional free charges are generated that is shown in the work [3]. Due to hydrodynamic reasons, alternating magnetic field is generated, mainly at frequencies of 4-12 Hz. Obviously, this additional source of the natural electromagnetic field has led to the above-mentioned result in comparison of "marine" and "land" cyclones.

Also the analysis of the data set in the work [2] has shown that passing of single frontal sections through the observation point causes strengthening of the signal average level, similar to strengthening in the situation of oncoming and passing of cyclones, but smaller in size; the coefficients of relation between the signal average level and distance to the front reach values of (- 0.68), between the dispersion of the signal and distance to the front – (- 0.64).

It should be noted that only behavioral experiments related to changes in the hydrobionts' motion behavior can clearly indicate the ecological significance of changes in the characteristics of the natural electromagnetic field during dangerous hydrometeorological processes. It is evident because in behavioral experiments the object is studied as "black box", when only a reaction to field's action is recorded without any knowing of the mechanism of perception of field.

During the preliminary experiments, carried out with catfishes, small shoals of Golden catfishes as the biological systems and closest relatives of expensive Japanese dwarf and Turkestan catfishes were used [47]. As a result, it was proved that catfishes increase their activity with increasing of extremely low-frequency electromagnetic disturbances. This situation was observed in the experiment when the lunar and solar eclipses were registered. Then the catfishes were extremely excited, almost jumping out of the aquarium. It is important to notice that the fish reaction was in advance of event. The catfishes could feel the lunar eclipse almost 7 hours before it started, but they could feel the sun eclipse only 30-40 min before it started.

As a result of the experiment, it is fair to say that catfishes are able to predict dangerous geophysical processes, in particular earthquakes and, as a consequence, tsunamis. During an eclipse the Sun, Moon and Earth are arranged in a straight line and it can increase seismic activity and cause an earthquake.

## **2 Estimates of the probable mechanisms of perception and presentiment of some hydrometeorological processes by hydrobionts**

### 2.1 Electromagnetic fields of hydrometeorological processes are as the information sources for hydrobionts

The problem of finding physical mechanisms of perception and presentiment of hydrometeorological processes by hydrobionts which is raised in the thesis leads to some conclusions, taking into account the completed review.

1. Hydrobionts (marine and freshwater), living in deep water, are able to obtain information about processes above the surface.

2. The «infrasonic sound of the sea» can't be a source of information because it does not penetrate in water.

3. The source of information can't be variations of hydrostatic pressure generated by wind waves. These variations are known to occur only at depths that are not greater than half the wavelength. And the majority of hydrobionts moves freely on the vertical axis, so these changes of hydrostatic pressure are "natural" for them.

4. Variations of atmospheric pressure can't be a source of information – they are extremely small for the water column.

5. Solar light can't be a source of information, especially in the northern seas.

Accordingly, it can be reasonably assumed that the only reliable source of information on processes over the sea is extremely low-frequency band electromagnetic fields generated by such processes.

The most likely sources of information in the physical mechanisms of perception of electromagnetic fields by hydrobionts are electromagnetic field of the atmospheric surface layer over the sea (subsection 1.1.2) and electromagnetic field of cyclones and frontal systems (subsection 1.1.4). The main reasons for this preference are the following:

1. Electromagnetic fields of the atmospheric surface layer over the sea are formed mainly by eddies that are generated behind wave crests during storms [1]. The magnetic component of such fields is directed along the axis of eddies, that is, horizontally and

along the crests. At the same time the electric vector is orthogonal to the magnetic component. As a result, the conditions for field's propagation both upwards and perpendicular to wave crests appear. This is so, because an energy flux vector of electromagnetic field (the Umov-Poynting vector) is determined by the vectorial vector of the electric and magnetic vectors, so it is perpendicular to the subspace of these vectors.

2. Electromagnetic fields of cyclones and frontal systems have been revealed experimentally, and they haven't been theoretically investigated. However, the experimental data [1,2] also show these electromagnetic fields' propagation mainly in the direction of their movement, thus they can also be a reliable source of information for hydrobionts.

3. Geomagnetic disturbances penetrating into the water column are also important for hydrobionts. This is determined for a number of species, for example in the work [19]. From our point of view, the need for perception of geomagnetic disturbances is due to the presence of the frequencies corresponding to the heart rate and breathing rhythm. Accordingly, such disturbances seem to disturb the normal rhythm of heart rate and breathing rhythm.

## 2.2 Calculations of penetration of extremely low-frequency band electromagnetic fields in water

Electromagnetic fields of hydrometeorological processes at frequencies 0.1-2 Hz and 6-8 Hz are of primary interest for our tasks. Sources of electromagnetic fields of the first area are processes in the upper atmosphere, and electromagnetic fields of the second area are processes in the troposphere.

6-8 Hz electromagnetic fields according to the brief description in the thesis have the horizontal magnetic field vectors. At the air-sea interface, the horizontal components of alternating magnetic field are equal [48]. Due to the almost identical values of the absolute magnetic permeability, the horizontal components of the magnetic induction are also equal.

Calculations of the penetration of electromagnetic fields in different basins have been made with a well-known formula 2.1:

$$h = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu_a}} \dots\dots\dots(2.1)$$

where  $h$  is the equivalent depth of penetration of current (electromagnetic field) into a massive conducting medium;

$\omega = 2\pi f$  – angular frequency of field;

$\gamma$  – electrical conductivity;

$\mu_a$  – absolute magnetic permeability.

The depth ( $h$ ) of electromagnetic field decreases in  $e$  times. Accordingly, this depth is called the thickness of skin-layer.

Calculations of the depth  $h$  have been made for the frequencies selected earlier for different values of  $\gamma$  (table 2.1).

It turns out that at the frequencies, which interest us, the thickness of skin-layer exceeds hundreds of meters for most of basins.

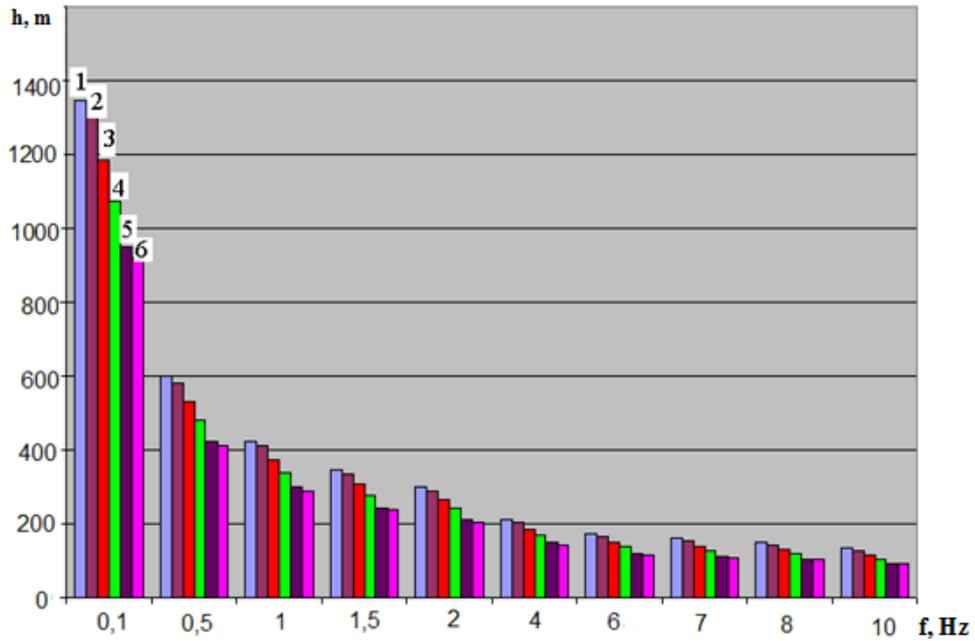
Here, besides depending on frequency, depending on electrical conductivity has been obtained. The thickness of skin-layer decreases nonlinearly with increasing of electrical conductivity.

Table 2.1-Penetration depth (skin-layer) of extremely low-frequency band electromagnetic fields for some water bodies

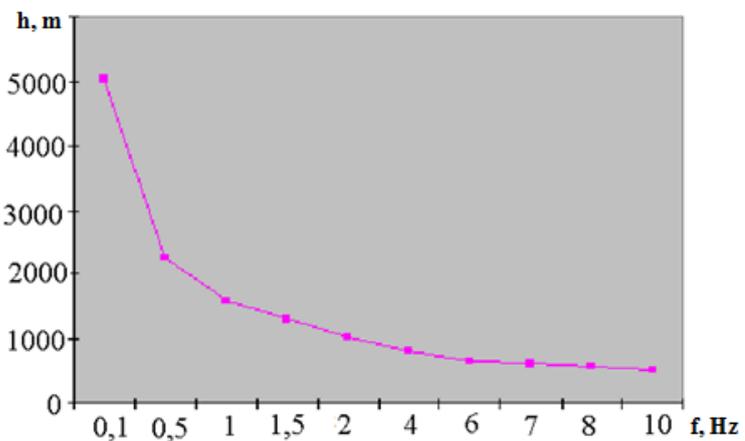
Water body	Salinity ‰	Electrical conductivity S/m	Frequency, Hz									
			0.1	0.5	1	1.5	2	4	6	7	8	10
Fresh water	-	0.01-0.1	5030	2250	1590	1300	1124	795	649	600	562	503
Baltic Sea	11	1.4	1344	601	425	347	300	212	173	160	150	134
Azov Sea	12	1.5	1300	580	410	335	290	205	168	155	145	130
Caspian Sea	13-15	1.8	1185	530	374	306	265	187	153	141	132	118
Black Sea	18	2.2	1072	480	339	276	240	170	138	130	120	107
White Sea	25	2.8	950	425	300	245	212	150	122	113	106	95
Barents Sea (coastal waters)	25-27	3.0	918	410	290	238	205	145	118	108	102	92

The generalized distribution of thickness is shown in picture 2.1.

Picture 2.2 shows the variability of the skin-layer thickness for freshwater basins. The calculations are represented for conductivity values of 0.1 S/m. Here the selected frequencies of hydrometeorological processes' electromagnetic fields can mostly penetrate to bottom. For example, for Lake Baikal the average depth is 730 meters, the maximum depth – 1640 m.



Picture 2.1 – Thickness of the skin-layer for some seas of the Russian Federation at different electromagnetic field' frequencies. Identification numbers: 1 – Baltic sea; 2 – Azov sea; 3 – Caspian sea; 4 – Black sea; 5 – White sea; 6-Barents sea (coastal waters).



Picture 2.2 – Thickness of skin-layer at different frequencies of electromagnetic fields in freshwater basins.

According to the represented calculations, it can be reasonably assumed that the only reliable source of information on processes over the sea is extremely low-frequency band electromagnetic fields generated by such processes. This information is particularly

important for animals living in the littoral and sub-littoral zones, as it allows them to avoid death during storms.

### 2.3 Probable mechanisms of hydrobionts' presentiment of changes in the hydrometeorological conditions of their environment

As mentioned earlier in the thesis, extremely low-frequency band electromagnetic fields for many living beings, in particular hydrobionts, are almost the only source of information about biologically significant processes. However, as recent studies have shown [49], the perception of the electric field variations excited by hydrometeorological processes directly or indirectly through alternating magnetic fields of these processes is not the only mechanism of hydrobionts' presentiment of oncoming processes. It turned out that quite a significant role is played by direct reception of extremely weak alternating magnetic fields (tens nT) generated by hydrometeorological processes. In addition, the high sensitivity of some aquatic animals to alternating magnetic fields in the area of geomagnetic disturbances has been revealed.

Considering the question of probable mechanisms of presentiment, it is necessary to recall the name of such an outstanding scientist as A. L. Chizhevsky, who was the first man to deal with the problems of the connection between biological processes and solar activity. It was A. L. Chizhevsky who introduced the concept of still undetected Z-factor, trying to explain the mechanism of presentiment of solar flares [50,51]. It was shown on the example of corinebacterium that some organisms "feel" solar flares 4-5 days before their observation by astrophysical methods and almost a week before the start of the relevant geomagnetic disturbances. Thus, Chizhevsky suggested that some unknown Z-radiation comes from the Sun deep layers and precedes the beginning of the recorded changes in activity (the appearance of Sunspots). Therefore, we can assume that this Z-factor affects many processes on the Earth.

The reaction of biological objects to magnetic storms, as well as the existence of some Z-radiation can be explained by the resonance response of the most important organs and systems of living organisms to increase of long-period oscillations of the Earth's

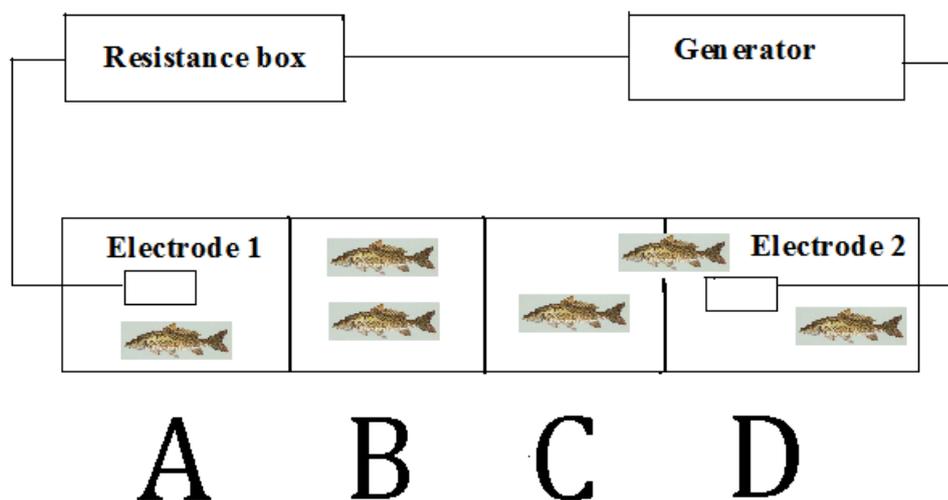
magnetic field both during storms and in some cases before them. The reason for the occurrence of long-period oscillations of the geomagnetic field before magnetic storms may be a change in the solar wind's oscillatory regime a few days before oncoming of geoeffective solar wind flows to the Earth.

### 3 Development of new technologies for carrying out of the physical experiments with some hydrobionts

#### 3.1 New experimental facilities for research

##### 3.1.1 A facility for definition of catfish motion behavior under the influence of alternating electric fields

To study the influence of electromagnetic fields on hydrobionts' motion behavior small aggregations of Golden catfishes (*Corydoras aeneus*) were used as representatives of electro-sensitive fish. It should be noted that the studies were conducted with fish of different age groups, and their sex was not taken into account. So we can talk about the universality of the obtained data. The experiments were carried out in a basin of 186 cm length, divided by external marks into 4 identical sections – A, B, C, D (Picture 3.1).

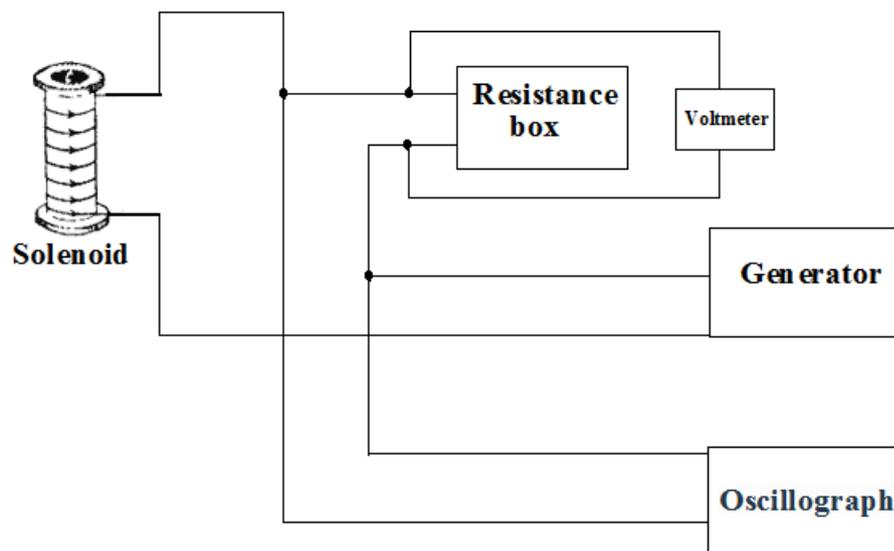


Picture 3.1 – The scheme of the facility with a long aquarium.

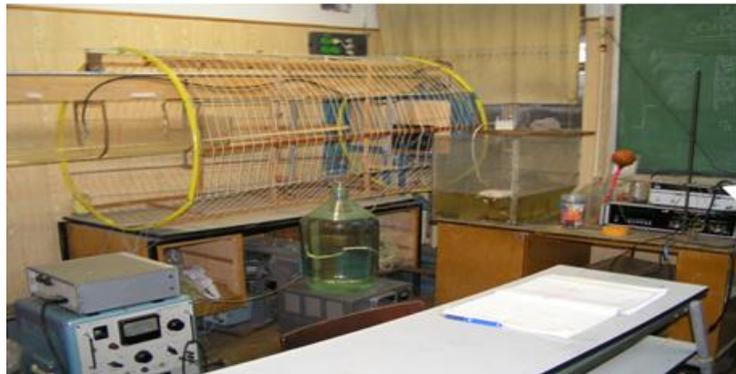
The simulated electric field in the aquarium was created by plate electrodes. Experiments were carried out at frequencies: 0,5; 1; 2; 4; 7 Hz. The voltage generated in the experimental basin was 0.5 V, respectively, the electric field intensity was 2.7 mV/cm.

### 3.1.2 A facility for definition of catfish motion behavior under influence of alternating magnetic fields

The alternating magnetic field in the aquarium was created with a solenoid. The experimental basin was located inside the solenoid. The scheme and general view of the facility are shown in pictures 3.2 and 3.3. The research was conducted at frequencies: 0,5; 1; 2; 4; 7; 10 Hz.



Picture 3.2 – The facility scheme.



Picture 3.3 – The facility general view.

At a given current strength of  $25 \mu\text{A}$ , the magnetic induction was  $100 \text{ nT}$ .

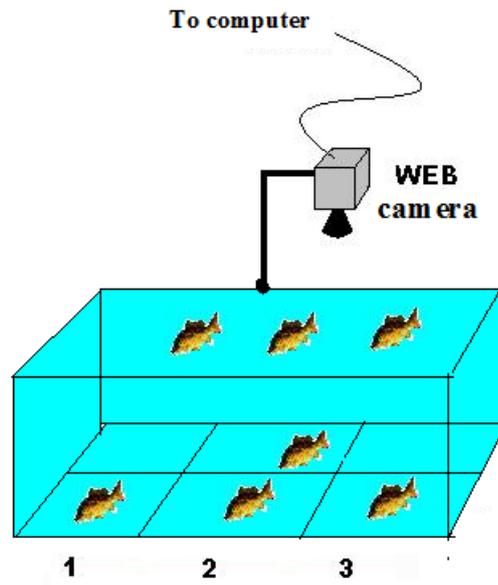
### 3.1.3 The automated definition of motion behavior of carps and catfishes with the help of a video camera

Carp as the most common type of fishes in aquaculture systems were chosen to study the effect of geomagnetic disturbances on hydrobionts' motion behavior, but for some experiments Golden catfishes were taken as the most available type of catfishes. The studies were carried out in an experimental aquarium with sizes of 260x370x165mm, which was divided into six identical sections A, B, C, D, F, E (Picture 3.4). The automatic registration system with a video camera placed above the aquarium was used in the experiments for the first time. That system made it possible to obtain the simultaneous observation of the whole area. The camera was connected to a managed timer of time-lapse photography with the subsequent transfer of the received image frames of aquatic organisms' motion behavior to a personal computer for further analysis [52]. The technical result of this solution is the possibility of automatic registration of hydrobionts' motion behavior in the laboratory aquarium at certain time intervals and for a long time.

The facility scheme is shown in picture 3.5, and picture 3.7 is its photograph. Picture 3.6 shows a video image of the fish location.

A	B	C
D	E	F

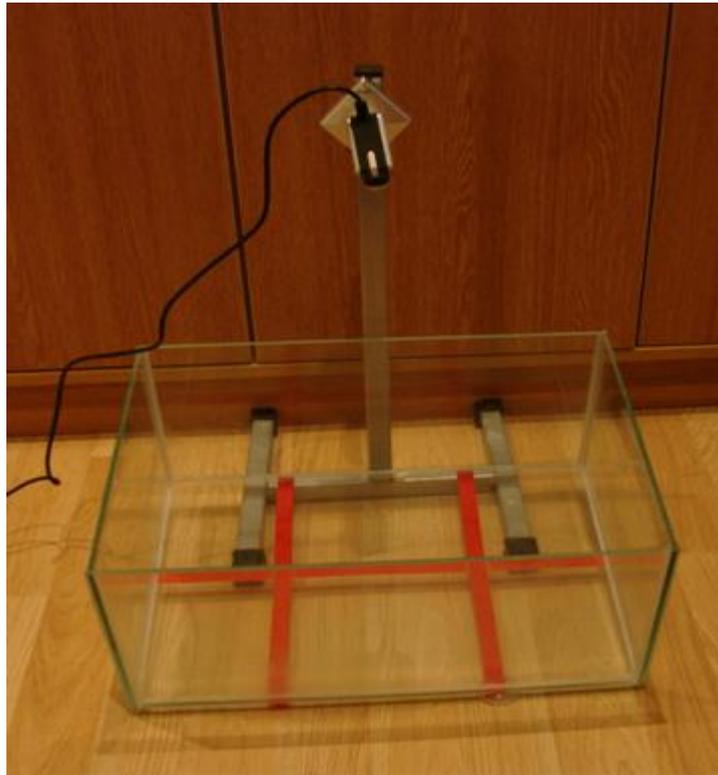
Picture 3.4 – The scheme of experimental aquarium separation into sections.



Picture 3.5 – The facility scheme.



Picture 3.6 – A video image example.



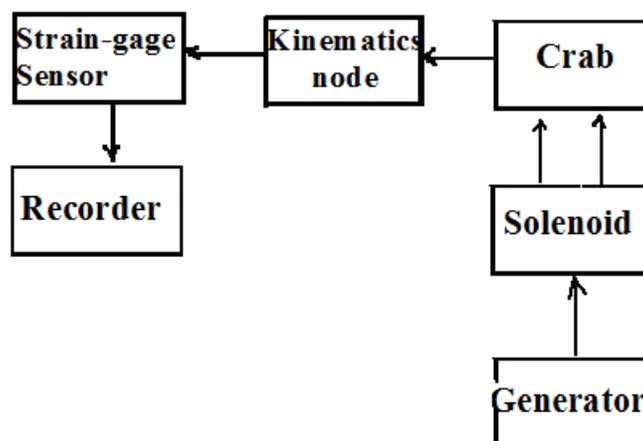
Picture 3.7 – Photograph of the facility.

The number of fishes was determined in different sections of the aquarium in each video frame. If a fish was fixed on the border of sections, the value of 0.5 was added to each of the border sections. The variability of fish locations from one video frame to the next characterized the intensity of movements per unit time (1min), which was interpreted as motion behavior  $R_i$ . The variability of  $R_i$  characteristics during the experiment was analyzed in connection with natural or artificial factors. Aquarium lighting, temperature and water composition remained constant.

A group of 8 fishes as biological objects was studied. After fishes had been moved to the experimental pool the adaptation period was 15-20 minutes. Experiments were carried out under various geomagnetic and weather conditions. The data on geomagnetic disturbances at the time of the experiments were used from Sodankylä Geophysical Observatory (Finland) ([www.sgo.fi](http://www.sgo.fi)). The data on the weather were taken from the website of meteorological center of Germany ([www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)), and the synoptic maps were obtained from the North-West Administration of Federal Service of Russia on Hydrometeorology and Monitoring of the Environment (Roshydromet).

### 3.1.4 Automatic method of registration of King crabs' motion behavior

The research was carried out with the laboratory facility at Murmansk Marine Biological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Picture 3.8). This facility allowed registering crabs' motion behavior in the automatic regime. As a recorder in the first series of the experiments, a high-speed recorder was used, in the second series – a personal computer (PC) with an analog-to-digital converter (ADC) at the input. Artificial magnetic fields were created with a solenoid, which an aquarium with crabs was put in. The solenoid was connected to the generator of extremely low frequencies. Magnetic field in the solenoid corresponded to natural fields.



Picture 3.8 – The facility construction.

As follows from the description of the facility, crabs placed in it are influenced by the external conditions comparable to the conditions of their natural habitat. King crabs adapted to the Barents Sea conditions were used for the experiments. The registration of motion behavior was carried out in the automatic regime.

To study the impact of artificial alternating magnetic field, a solenoid was placed around the basin. Extremely low-frequency current flew through the solenoid at certain discrete frequencies. Frequencies were selected from the range from 0.1 Hz to 15 Hz. Magnetic field in the solenoid was accordingly calculated with the value of the current.

### 3.2 Experimental methods

The methodology of the experiments with carps and catfishes proceeded as follows: at the time  $t_1, t_2, \dots, t_n$  the number of fishes was determined in each section. Determination of motion behavior started in 20-30 minutes after fishes had been put into the aquarium for their adaptation. The experiments were carried out with 1 minute sampling interval. If there were no fishes in any section at the time of registration, this status was determined as 0. The duration of each experiment was at least 3 hours. In the case of alternating magnetic and electrical fields, the responses of catfishes to the absence of field exposure (first control), to the influence of field (fish reaction) and again to the absence of field exposure (second control) were determined.

Calculation of motion behavior was carried out with the formula (3.1), where motion behavior is the sum of all the differences of the pairs of counts + 0.1 for each term:

$$\Delta a + \Delta b + \Delta c + \Delta d = R_i \quad (3.1)$$

where  $\Delta a = |(a_i - a_{i+1})| + 0,1$ ;  $\Delta b = |(b_i - b_{i+1})| + 0,1$ ;  $\Delta c = |(c_i - c_{i+1})| + 0,1$ ;  
 $\Delta d = |(d_i - d_{i+1})| + 0,1$ .

Here  $R_i$  is the dimensionless characteristic of fishes' motion behavior from one section to another; the quantity of fishes  $N = \text{const}$ ;  $a, b, c$  and  $d$  with indexes  $(i)$  and  $(i+1)$  – quantity of fishes in each section at the moments of time  $i$  and  $i+1$ , respectively.

Therefore, the obtained  $R_i$  series describe fishes' motion behavior and its variability during the experiment.

The data series of crabs' motion behavior were obtained by conducting experiments in the aquarium (subsection 3.1.4). Besides the measurements of crabs' motion behavior, such factors as atmospheric pressure, air temperature, and some types of baric formations above the research area were determined during the experiments. As it was mentioned earlier, atmospheric conditions do not have a direct impact on animals' behavior, but they influence indirectly due to generating of extremely low-frequency band electromagnetic

fields, that can deeply penetrate into the sea water (up to 100 m). Illumination was taken into account, as crabs spend a part of their life at shallow depths in spring and summer with a sufficient amount of daylight. This shows the need to take into account a number of factors in the analysis, as incorrect conclusions could be made, otherwise.

### 3.2.1 Similarity criteria of modeling of the influence of hydrometeorological processes' electromagnetic fields on some types of hydrobionts

The task of finding similarity criteria of modeling the impact of some external factors on biological objects is not trivial. Indeed, such issues were not considered earlier: it was believed that the impact in laboratory is equal to the effect in nature. In particular, this is directly related to the impact of extremely low-frequency band electromagnetic fields on biological systems.

However, a number of the available experimental data, including the data of the author, give an opportunity to call into question the equality. This leads to the problem of finding the most advisable conditions for modeling of impacts with appropriate similarity criteria.

The solution, apparently, is only possible by successive approximations. Due to the uncertainties with mechanisms of perception of electromagnetic fields by biological objects similarity criteria can't be well defined at present. According to the collected data, it is advisable to consider any of these objects as a *dynamic system*, described generally as a nonlinear differential equation, and in a particular case – as a linear differential equation of the n-th order [3.2]:

$$T_n^n \frac{d^n R(\tau)}{d\tau^n} + T_{n-1}^{n-1} \frac{d^{n-1} R(\tau)}{d\tau^{n-1}} + \dots + T_1 \frac{dR(\tau)}{d\tau} + R(\tau) = K_{R/x} X(\tau), \quad (3.2)$$

where  $T$  is the coefficient (to the appropriate degree) having a dimension of time and equivalent to a technical term «time constant»;

$R(\tau)$  – the biological object's respond to the influence;

$X(\tau)$  – acting factor;

$K_{R/x}$  – the ratio of response/signal in a state regime.

In the simplest case of the first order system, the equation is [3.3]:

$$T_1 \frac{dR(\tau)}{d\tau} + R(\tau) = K_{R/x} X(\tau) \quad (3.3)$$

This approach to the consideration is the most efficient, because it allows to link the spectral characteristics of the influencing signals and reactions. The equation is solved by the introduction of a complex transfer function  $F(i\omega)$ , the components of which are: an amplitude-frequency characteristic, in other words, the module –  $|F(i\omega)|$ , and a phase-frequency characteristic –  $\phi(i\omega)$ . The connection between spectral characteristics of the influencing signals and hydrobionts' reactions, noted above, will be expressed in the form of [3.4]:

$$S_R(\omega) = |F(i\omega)|^2 S_x(\omega), \quad (3.4)$$

where  $S(\omega)$  – the spectral density functions of the response or signal according to the index.

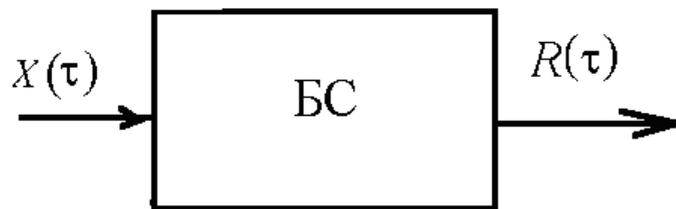
Besides spectral distortions, phase distortions occur in the impact-reaction experiments. They are evaluated by the dynamic system's phase-frequency characteristic. In the case of the simplest linear system of the first order phase-frequency characteristic has the next form [3.5]:

$$\varphi(\omega) = -\text{arc tg}(\omega T_1) \quad , \quad (3.5)$$

where  $\omega = 2\pi f$  – angular frequency;

$T_1$  – time constant (the time interval during which the initial difference between the impact and the reaction decreases "e" times). More information about this can be found in the work [10].

All this is still when  $K_{R/x}=1$  and the phase shift expresses in angular degrees. However, biological systems appear to be hardly described by linear differential equations. There is no fundamental novelty in this – nonlinear dynamic connections in biological systems were studied, for example, in relation to biological membranes and various types of biochemical reactions (see for example the source [53]). However, it is not possible to use these results in the analysis of animal behavior and, in particular, aquatic organisms. A more general approach is needed. And, apparently, the most reasonable way is to consider such objects, and also groups of objects, as a cybernetic "black box" with a known signal  $X(\tau)$  at the input (influencing factor) and a recorded reaction  $R(\tau)$  at the output (Picture 3.9).



Picture 3.9 – Biological system (object, group of objects) as a «black box».

Previously such an approach has already been proposed in the work [12]. At the same time, not only linear dynamic properties of biological systems were considered, but also the presence of nonlinear properties was assumed. However, the experimental evidence was given only for physico-chemical systems. In this work we consider the results of the study of biological systems' nonlinear dynamic properties (object, group of objects).

The meaning of this approach in physical terms is that the biological object, in our opinion, can't respond to any short-term changes in external factors  $X(\tau)$ , because there is

not any sense of such reactions – too much fear susceptibility isn't a good feature in the biological world. The reaction is formed only after certain duration of exposure ("accumulation of information"), the question of a type of duration should be studied. The reaction can be formed in the simplest case only with a delay in time. In this case it is necessary to consider only the first derivative in the given equation. The reaction may be more complex, including resonance effects, and then it is necessary to take into account the highest derivatives. In both cases, nonlinear effects must be taken into account.

The so-called "latent period" has been introduced in biophysical studies. Usually this is a time between the beginning of some influence and response to it. In the study of hydrobionts' reactions latent periods were determined only for the influence of a constant factor, in other words, a rectangular signal ("stimulus"), the value of which does not change with time (see, for example, the work [19]). In this work [19] the difference of hydrobionts' responses to polarity of influencing stimulus is considered. Differences in polarity are defined as "anodic stimulus" and "cathode stimulus", and in this case, reactions opposite in sign have been observed ("inhibition" or "innervation").

When there are variable signs of "stimuli", variable types of reactions are formed, that is, reactions "track" changes of stimuli (see the source [19]). These "tracking" changes are observed at very low frequencies.

However, in our studies, we used variable stimuli of different frequencies, for example alternating magnetic and electric fields. And during the period of exposure, the stimulus polarity changed many times (see the data from subsections 4.2.2, 4.2.3 and 4.4). If the reactions to the change in polarity had the same value and opposite forms ("innervation" or "inhibition of motion behavior, for example), the general result of the influence of *variable* stimulus would not be.

However, the results of the impact are distinctly detected in both electric and magnetic fields of different frequencies.

The term "latent period", strictly speaking, is applied only in influence of the *constant* factors on biological systems. Using it in case of reactions to variable factors with a zero constant component seems to be not quite correct, and in this work the term "delay time of reaction" is used.

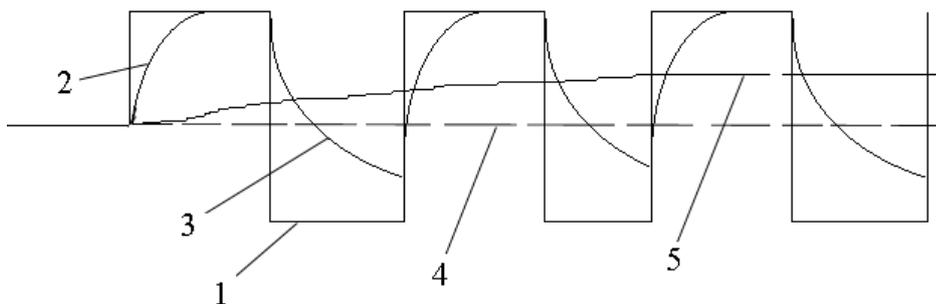
*Nonlinear dynamic properties. Theoretical consideration.*

Then it turns out that dynamic properties of hydrobionts as biological systems can't be linear, corresponding to the equations (3.2) or (3.3), and their reaction to a variable signal can only be the result of *dynamic properties nonlinearity*.

The nonlinearity of dynamic properties in relation to biological systems is most likely in the following situations: *the reaction to the increase of influencing factor is significantly faster than the reaction to its decrease*. This seems quite natural. The influencing factor carries some potential danger, so it must be responded faster (but not immediately!). Decrease of the same factor means reducing the risk, but the "memory" of this potential danger still act, that is why the reaction is slower. For the variable factor (for example, in case of the magnetic field variations), the *cumulative* effect is obtained, as shown in picture 3.10. Actually, this is the resulting reaction of a biological system.

Picture 3.10 shows the influencing variable factor as alternating rectangular pulses of a constant repetition rate with a duty ratio equal to 2. Generally, individual pulses of this type ("anodic" or "cathode" "stimuli") are used in the traditional biophysical experiments with aquatic organisms.

"Squareness" in our case does not matter in principle. It is used to illustrate. The same cumulative effect is formed by sinusoidal stimulus.



Picture 3.10 – The scheme of the cumulative effect formation. Identification numbers: 1 – variable stimulus; 2 – reaction to the increase of the influencing factor; 3 – reaction to the decrease of this factor; 4 – the average value of the factor; 5 – the cumulative reaction of a biological system.

Reactions in the form of the exponents 2 and 3 are the solutions of the simple linear differential equations of the first order (3.3) at different time constants.

These solutions are here [3.6]:

$$\begin{aligned} R_i(\tau - \tau_{0i}) &= X_m + (X_0 - X_m) e^{-\frac{\tau - \tau_{0i}}{T_i}}; \\ R_d(\tau - \tau_{0d}) &= X_0 + (X_m - X_0) e^{-\frac{\tau - \tau_{0d}}{T_d}}; \end{aligned} \quad (3.6)$$

where the indices "i" and "d" refer to the increase of the influencing factor ("i") and its decrease ("d");

$X_m$  – upper value of the influencing factor;

$X_0$  – its lower value;

$\tau_0$  with the appropriate indices – the moments of the beginning of increase or decrease of the influencing factor;

$\tau$  – time;

$T$  – time constants with the appropriate indices.

The differences between the constants  $T$  during increase ( $T_i$ ) and decrease ( $T_d$ ) of the influencing factor define the accumulation effect.

The average value (number 4) of the variable influencing factor (number 1) (Picture 3.10) remains constant here, but the reaction of the biological system (number 5) at the beginning of exposure increases to some asymptotic value and then remains constant if the influencing factor frequency doesn't change.

Naturally, what is shown in picture 3.10 is only a special case. It is necessary to pay attention to this, because the *saturation* of the system here takes place due to the cumulative effect in only a few periods of the influencing variable factor.

Let's consider a situation when the differences between  $T_i$  and  $T_d$  are significantly smaller. It is not as clear as in picture 3.10, but the results of the equation (3.3) are similar. However, for a half-period the curve with number 2 does not have time to reach the asymptotic value  $X_m$  of the influencing factor (Picture 3.10). Accordingly, the curve with

number 3 behaves in a similar way considered earlier. In this case, there is a cumulative effect *prolongation*. At the same time, the asymptotic value of the biological object reaction (number 5) is obtained through a significantly larger number of periods of the influencing factor. And the smaller the differences, the more number of periods should pass. This is an extremely important aspect, because at the present time we have almost no idea about the values of constants  $T_i$  and  $T_d$  considering a biological object as a nonlinear dynamic system. Therefore, it is impossible to *judge* the specific properties of such system, we can only *assume* these properties.

However, it can be assumed that the reaction to variable stimulus can't increase indefinitely. It has the asymptotic value, which is appropriate to be called as the *most expected response*.

*Criteria.* In this work, similarity criteria are proposed only in the approximation of the first order effects corresponding to the solutions of the equations (3.6) and (3.3). There is a long period of electromagnetic field exposure under natural conditions, for example, when a cyclone comes. Let's define such period as  $T_n$ . Accordingly, accumulation of the reaction is associated with the duration and current electromagnetic (electric or magnetic) field intensity. In the laboratory experiments it isn't efficient to set the similar periods.

If in the experiments we set the period provided that  $T_l \ll T_n$ , the similarity criteria will be expressed in the form of [3.7]:

$$T_n B_{mn} = T_l B_{ml}, \quad (3.7)$$

where  $B_m$  with the appropriate index is the amplitude value of the induction of alternating magnetic field, and the indices mean: laboratory ("l") and natural ("n") values of characteristics.

Modeling the effects of alternating electric field, similar criteria would be [3.8]:

$$T_n \varepsilon_{rel}^n E_{mn} = T_l \varepsilon_{rel}^l E_{ml} \quad (3.8)$$

where  $\varepsilon_{rel}$  – relative dielectric permeability with the appropriate indices of the medium;

$E_m$  is the amplitude value of the intensity of alternating electric field that influences the system.

The criterion (3.7) can be illustrated in a certain way.

The following results are obtained when the average value of the alternating magnetic field induction of an oncoming cyclone is about 5-10 nT and the time of cyclone's oncoming is about 20 hours (average speed of about 30 km/h). In the experiments on modeling responses to oncoming of the cyclone field (duration of exposure 1 hour), it is necessary to increase the induction by about 20 times, that means to set it about 100-200 nT at the "current" frequency of the cyclone electromagnetic field of about 6-8 Hz.

The criteria (3.7) and (3.8) are given under the condition of adequacy of influencing frequencies in model and in nature. It is incorrect to set different frequencies.

### 3.3 Methods of processing of the obtained experimental data

#### 3.3.1 Spectral and cross-spectral analyses

Processing of the obtained series of motion behavior, as well as series of the magnetic induction on the X-axis ( $B_x$ , nT) was carried out in the statistical program Mesosaur. In order to separate the useful signal we used a band-pass filter, which allowed to filter out certain frequencies that are necessary for calculations. After the filtration, some graphs of the magnetic induction  $B_x$  and fishes' motion behavior were constructed. We chose the moving average digital filter from the smoothing filters. The algorithm of its calculation is simple: the last values of the series are added, and the sum is divided by their number.

The graphs of motion behavior values and the spectral density function, which describes the distribution of power into frequency components composing the signal, were constructed and analyzed in the processing. Also the main moments of the distribution of the obtained data (mean, variance) were evaluated. The cross-spectral analysis of smoothed series of the magnetic induction and motion behavior was used to determine the presence or absence of harmonic components in the studied series. The strength of the relationship between the series was calculated (through the coherence function).

#### 3.3.2 Estimates and the analysis of fractal dimensions of the studied processes

In order to determine the degree of fish behavior determinacy during the experiment, the fractal dimension of the process was calculated using the fractal theory methods [54]. The dimension is related to the so-called Hurst index ( $H$ ) and defined as the difference ( $2-H$ ). The Hurst index is described by an empirical relation [3.9]:

$$H = \log_{(\tau/2)}(R/S) \quad (3.9)$$

where  $H$  is the Hurst index;  $\tau$  – the time interval;  $R$  is the range, that is, the difference between the maximum and minimum values for the considered period;  $S$  is the standard deviation. In practice, the  $H$ -index is determined by the slope of an approximation straight line for the dependence of  $\lg(R/S)$  on  $\lg(\tau)$  [3.10]:

$$\lg(R/S) = H \lg(\tau) + const \quad (3.10)$$

For a process of independent testing –  $H=0.5$ . When  $H>0.5$ , the time series has a persistent behavior. That means that the process is deterministic. The calculations were carried out with using the original software package "Herst".

Further processing of the experiment data consisted in plotting the dependence of the Hurst-index and variance of motion behavior on the influencing factor.

### 3.3.3 Methods of determination of hydrobionts' response to the influence of alternating electric and magnetic fields in the laboratory conditions

As the time series obtained in these experiments are generally non-stationary, their processing can't be carried out by standard methods. A very complete review of methods for processing of the non-stationary time series is given in the monograph [55].

Naturally, all possible methods could not be used in this work. The most interesting for our tasks set in this work are the following:

- splitting of non-stationary series into quasi-stationary segments and processing of these segments according to known methods (for example [56]);
- using the variance of quasi-stationary segments as an indicator of group anomalies (here – the reaction of hydrobionts to the external factor) [57].

In the work [57] it is offered to use the relation of variances, and as the criterion of distinguishing anomalies the initially set values of such relation is used. Undoubtedly, this is very interesting for time series with a low "signal/noise" ratio, that is, for problems of

detecting weak "group signals" in the background of strong noises. However, in the experiments we accurately recorded the moment of influence. So it was more appropriate to use the difference of variances.

The impact result was defined as [3.11]:

$$\Delta = (D_r \pm \sigma_{D_r}) - (D_b \pm \sigma_{D_b}) \quad (3.11)$$

where  $D_r$  – the variance of motion reaction;  $D_b$  – the variance of the background; and  $\sigma_{D_r}$  and  $\sigma_{D_b}$  – the values of the mean squared deviations of the calculated series of variances.

The criterion for the formation of the reaction to the impact was the condition  $\Delta \geq 2\bar{\sigma}_D$ , where  $\bar{\sigma}_D = \sqrt{\sigma_{D_r}^2 + \sigma_{D_b}^2}$ .

This made it possible to pick out motion reaction to the impact of external field with a confidence level of 0.95 and the probability density of distribution of background and reaction variances close to the normal law.

In addition, the experiments with living moving objects require accounting reaction delays (biologists call them "latent period"). Really, living objects (fish) are unable to respond to any pulse change of the external factors. Therefore, quasi-stationary areas were distinguished taking into account this condition. If quasi-stationarity captured the latent period, we took it into account calculating the background variance.

In experiments with less mobile animals (King crabs) the method discussed above [58] was also applied. However, the filtered series were used with their further reduction to stationarity "in a narrow sense", that means, with a constant mathematical expectation.

For our purposes, it was decided to use the same source data, but without any filtering, and detect not the variance, but the intensity of the reaction at different frequencies.

The intensity of the reaction was determined as the difference [3.12]

$$\Delta_R = (\overline{MB_R} \pm \sigma_{MB_R}) - (\overline{MB_B} \pm \sigma_{MB_B}) \quad (3.12)$$

where  $\overline{MB_R}$  is the average motion behavior during the exposure;  $\overline{MB_B}$  – the average motion behavior of background;  $\sigma_{MB_R}$  and  $\sigma_{MB_B}$  – mean square deviations of the calculated motion behavior series.

The criterion for the presence of the reaction similar to the criterion in the case of variances was used:  $\Delta_K \geq 2\overline{\sigma_{MB}}$ , where  $\overline{\sigma_{MB}} = \sqrt{\sigma_{MB_R}^2 + \sigma_{MB_B}^2}$ .

*Estimation of confidence intervals.*

The series of variances and motion behavior were usually calculated on 20 points with a shift between areas by a given step (usually by 1 min). The processing was carried out with the use of the modern metrological methods [59-61].

That is, for example [3.13]:

$$D_{i+10} = D_{i \div 20} \pm \sigma_{D_i} \quad (3.13)$$

where  $D_{i+10}$  – the value assigned to the middle of the i-th segment of the series;  $D_{i \div 20}$  – the computed value of a segment variance for the series that consists of 20 points;  $\sigma_{D_i}$  – accuracy of determination of the i-th variance.

The calculation error of each value was estimated as [3.14]

$$\sigma_{D_i} = \pm 0,01D_i \quad (3.14)$$

as all third and subsequent significant figures were excluded in the calculated values [62].

As a result, the confidence interval of the reaction calculation according to the criterion described above was estimated as [3.15]:

$$\Delta_\Delta = \pm \frac{2\overline{\sigma_{D_i}}}{\sqrt{N}} \quad (3.15)$$

where,  $\overline{\sigma_{D_i}} = \sqrt{\sigma_{D_{ir}}^2 + \sigma_{D_{ib}}^2}$  and indexes "r" and "b" mean "reaction" and "background", N is the number of segments used to calculate variances.

This was possible because the definitions of the variances in the segments were of equal accuracy and the series were distinguished as quasi-stationary. These two conditions correspond to the metrological rules of evaluating measurement quality [63].

The confidence probability for the interval  $\Delta_\Delta$  was 0.95.

The described method was also used in the estimates of the confidence intervals of calculations of the reaction intensity.

### 3.3.4 Wavelet-analysis

Wavelet-analysis is a device adapted for studying the structure of inhomogeneous processes. In contrast to the Fourier transform, the wavelet transform provides a two-dimensional representation of the explored one-dimensional signal with the frequency and coordinate considered as independent variables. As a result, it becomes possible to analyze signal properties both in physical (time, coordinate) and frequency spaces [64].

Like the Fourier transform in which only the function  $w(t)=exp(it)$  that generates an orthonormal basis of the space  $L^2(0,2\pi)$  by a large-scale transformation is the basis of the analysis, wavelet-transformation is based on only the basic function  $\psi(t)$  that has a soliton-like nature and belongs to the  $L^2(R)$  space, that is, the whole numeric axis. In the Western literature this function has a fixed name – "wavelet", which means "small wave", in the native literature sometimes it is called "splash" in order to reflect its localization and oscillatory feature. Creating the basic analyzing function  $\psi(t)$  the following necessary conditions must be fulfilled.

Localization means that the wavelet must be located near the zero of the argument in both time and frequency spaces.

Zero mean [3.16]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3.16)$$

As a consequence, the wavelet must be an alternating function.

Limitation [3.17]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (3.17)$$

The wavelet must be a sufficiently fast decreasing function of the time (spatial) variable.

The basis of the one-dimensional discrete wavelet-transform is constructed on the basis of the wavelet  $\psi(t)$  by shift and stretch operations along the  $t$ -axis.

The continuous wavelet-transform is constructed in the same way using some continuous scale transformations and wavelet  $\psi(t)$  transfers with random values of the scale coefficient  $a$  and shift parameter  $b$  [3.18]:

$$W(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3.18),$$

where the symbol  $*$  indicates the complex conjugation operation.

Thus, any function of  $L^2(R)$  can be represented by a superposition of scale transformations and shifts of the basis wavelet with coefficients depending on the scale (frequency) and the shift parameter (time).

The two-parameter function  $W(a, b)$  provides information about the change in the relative contribution of components of different scales in time, and it is called the spectrum of coefficients of the wavelet-transform.

Having a wavelet spectrum, you can calculate the total energy of the signal [3.19]

$$E_f = \int f^2(t) dt = \iint W^2(a,b) \frac{dadb}{a^2} \quad (3.19)$$

and the global energy spectrum – distribution of the total energy by scales (scalogram of the wavelet-transform) [3.20]

$$E_w(a) = \int W^2(a,b) db \quad (3.20)$$

Scalogram corresponds to a power spectrum of the Fourier transform of the signal smoothed at each scale by the Fourier spectrum of the analyzing wavelet [3.21]:

$$E_w(a) = \int \left| \hat{f}(\omega) \hat{\psi}(a\omega) \right|^2 d\omega \quad (3.21)$$

where the symbol  $\hat{\phantom{x}}$  means the Fourier-image of the function.

Now wavelet-analysis is widely used in the tasks of pattern recognition problems, processing and synthesis of various signals for the convolution of large amounts of information and in many other cases.

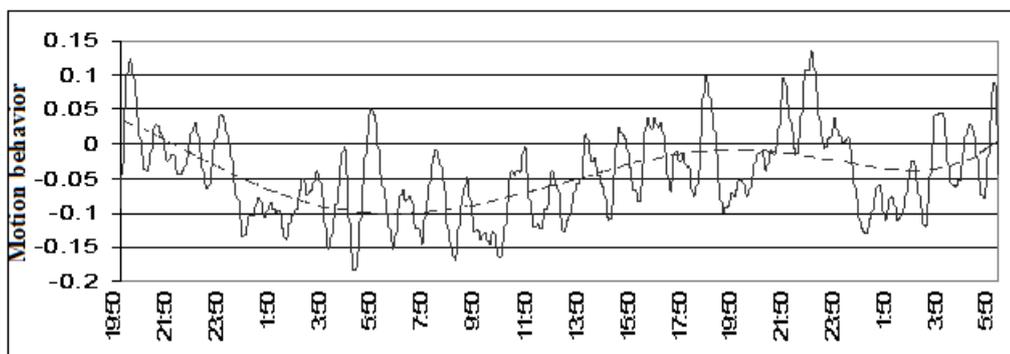
Wavelet-analysis is very convenient for analyzing processes with intermittent feature. It allows to reveal spatially distributed properties of the explored object, determine the presence of intermittency and distribution of dissipation areas, obtain local high-frequency and global large-scale information about the object, and this analysis has other opportunities with high accuracy and without redundancy.

## 4 Results of the experiments

### 4.1 Carps

#### 4.1.1 Daily variability of carps' motion behavior

For the purposes of identifying the physical mechanisms of perception and evaluation of hydrometeorological processes first it is necessary to determine the physiological variability of fish behavior – diurnal changes in motion behavior and behavioral rhythm. For this purpose, the data of the long-term (at least 24 hours) continuous observations with some constant external factors (temperature, pH of water, geomagnetic conditions, hydrometeorological factors, etc.) were used, in other words, those factors whose influence was revealed in the previous works (for example, [65-67]). The temperature was set at 18-20°C, pH – in the zone of tolerant conditions 7-9,5, light conditions – constant, geomagnetic conditions were controlled according to the current data of Sodankylä Geophysical Observatory (Finland), the lack of strong variability of hydrometeorological factors – according to the synoptic maps from the popular German web-site: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)



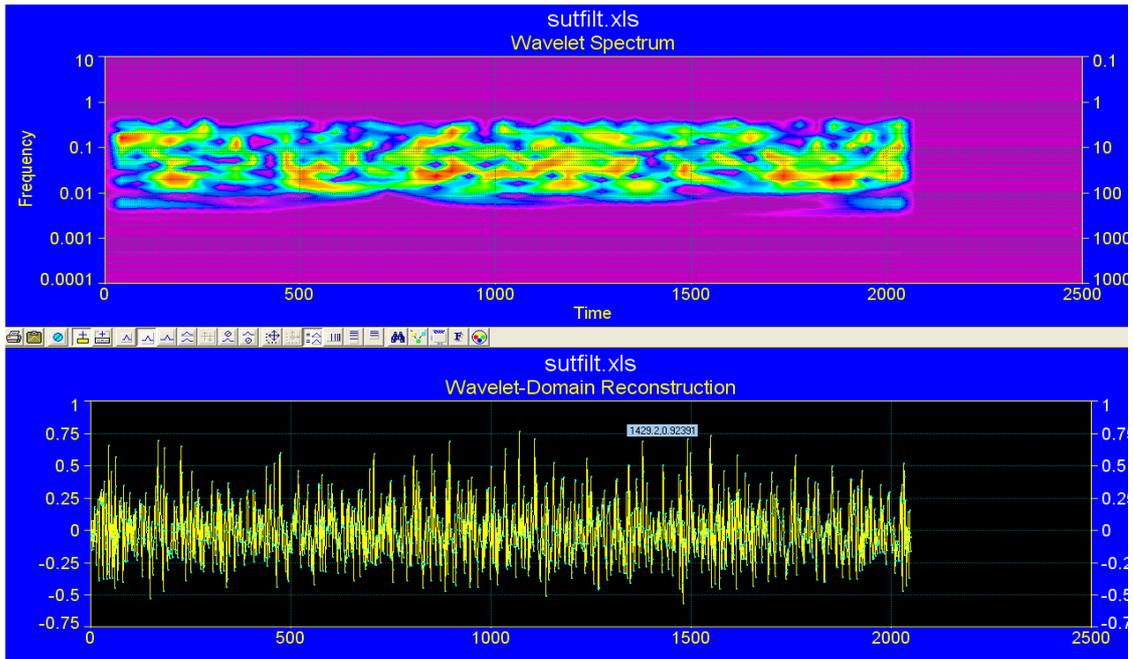
Picture 4.1 – Variability of carps' motion behavior during the day (on the X-axis – motion behavior, on the Y-axis – time of the experiment).

The picture 4.1 shows that the motion behavior decreases from 20:00 to 6:00 that confirms the presence of diurnal biorhythmics of carps. The rise of carps' motion behavior after 06 o'clock was also noted in the work [68]. However, a range of daily variations of the fish motion behavior was higher there. At the same time, unlike picture 4.1, the unnormalized data were used in the work [68].

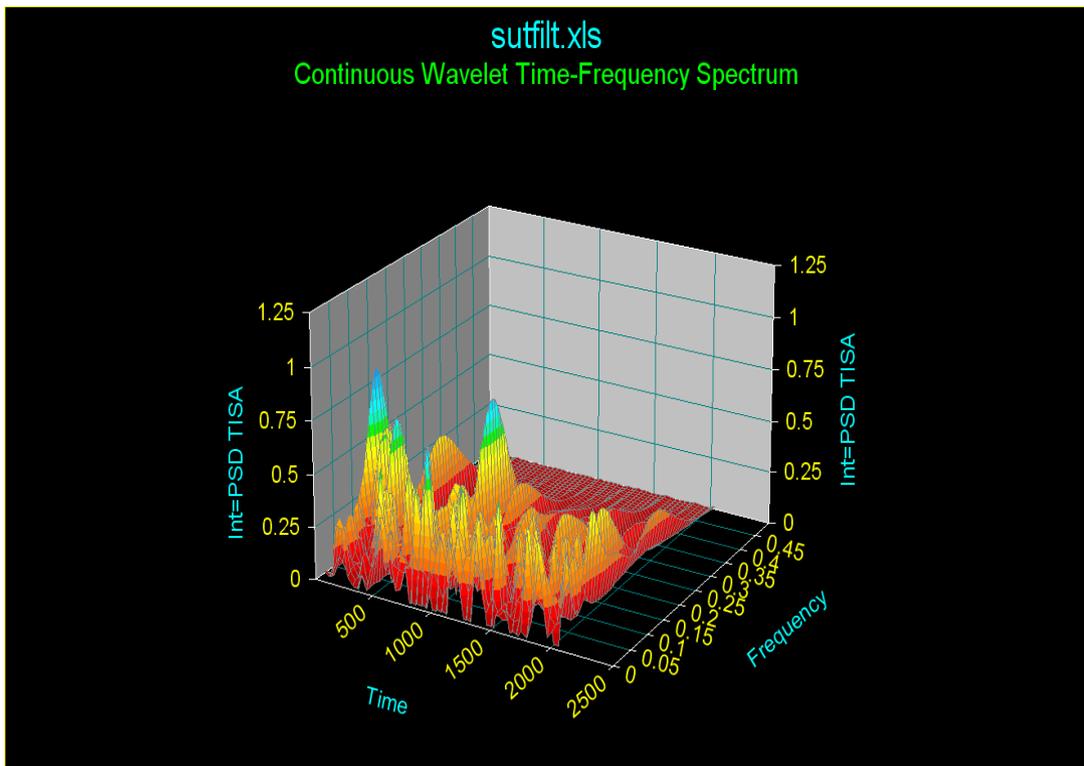
Now in the experiments carried out, the difference between the average values of motion behavior at day and night is only 0.1 units of motion behavior. Respectively, there was no need to introduce a correction factor for the time of day during the data processing. This graph hides the short-term random outliers, while retaining the general trend in the fish behavior.

With the help of wavelet analysis for the daily experiment with carps, the spectrum of motion behavior was obtained, presented in picture 4.2. In picture 4.3, this spectrum is reflected in a three-dimensional space. The AutoSignal package was used to process the series. At the first stage the basic wavelet was chosen. We considered the next wavelets: the Morlet and Paul wavelets, and the Gaussian derived function. The minimum mean-root square error was achieved for the eighth order of the Gaussian derived function. In this case the decomposition was optimal.

The analysis of the obtained images allows to reveal the ranges of local periods in fish behavior with scales about 30 min, 12-10 min, 5-4 min in the given non-stationary structure of the series, that fully confirms the results of the classical spectral analysis. The small-scale part of the process with periods of less than 2-3 min demonstrates the predominance of random processes over periodic ones.



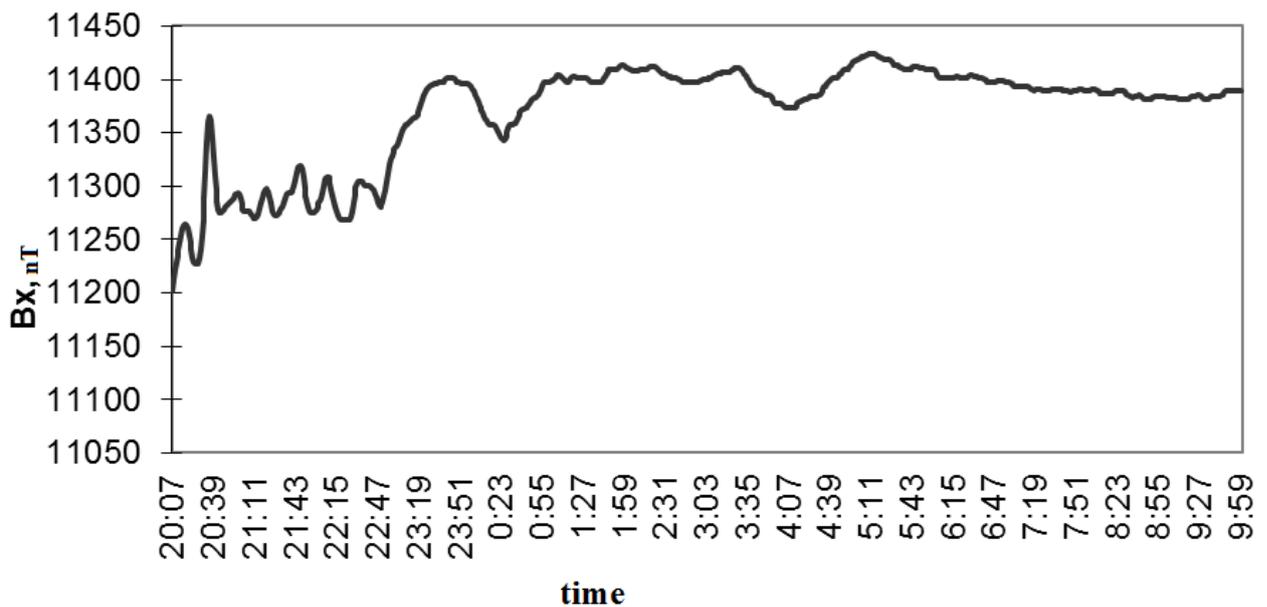
Picture 4.2 – Wavelet spectrum of the carps obtained during the daily experiment (upper graph) and filtered series of their motion behavior (lower graph).



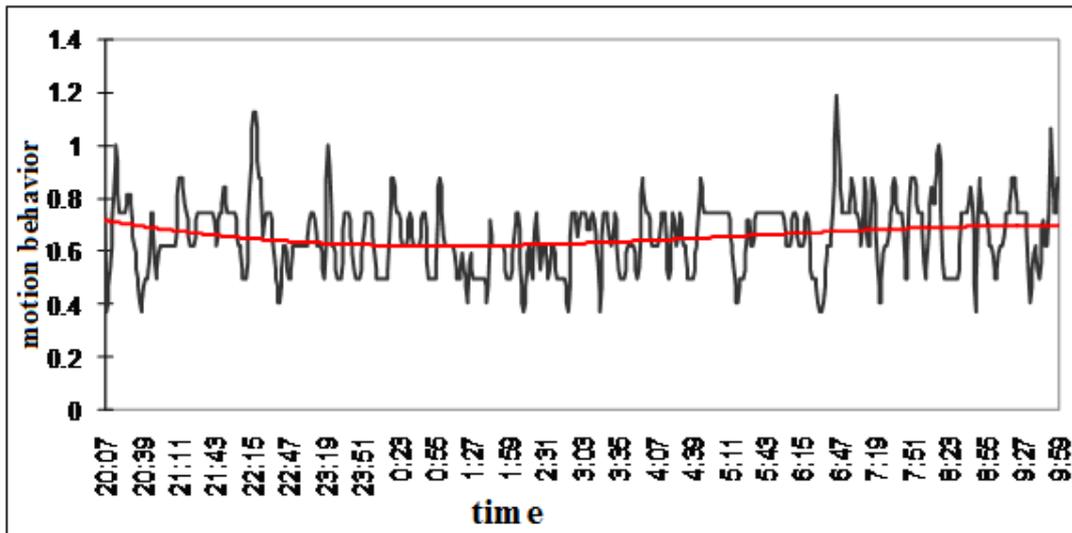
Picture 4.3 – Three-dimensional spectrum of the carps' motion behavior obtained during the daily experiment.

#### 4.1.2 Estimates of the relationship between the average means of motion behavior and geomagnetic disturbances

In the course of the series of the experiments, magnetic storms of the medium intensity (up to 250 nT or up to 6 K-index) were observed. According to the obtained data, a statistical evaluation of the series of the magnetic induction (an example is shown in picture 4.4) and motion behavior (an example is shown in picture 4.5) was carried out. In the process for the most successful experiments in terms of geomagnetic situation the correlation coefficient between the average values of motion behavior and magnetic induction amplitude  $K_c$  were estimated (Table 4.1). For these purposes, the data series were divided into pieces. A series of magnetic induction was chosen as the determining factor of division into pieces.



Picture 4.4 – Graph of the magnetic induction variations (experiment 05.09.08).



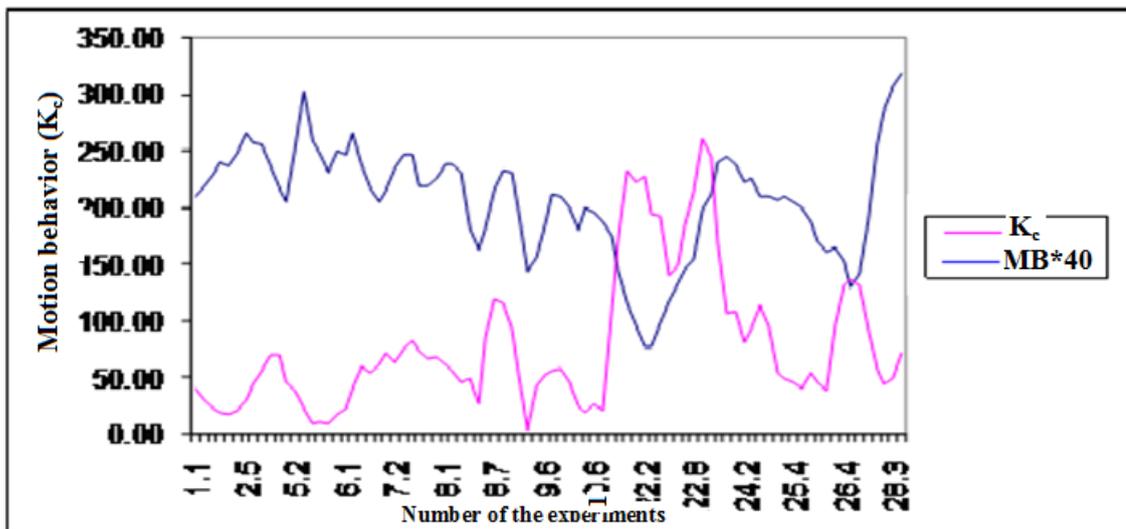
Picture 4.5 – Carps' motion behavior (experiment 05.09.08).

Table 4.1 – The values of the correlation coefficient between the series of the fish motion behavior and magnetic induction (the significant coefficients at a significance level of 0.05 are indicated in a red color)

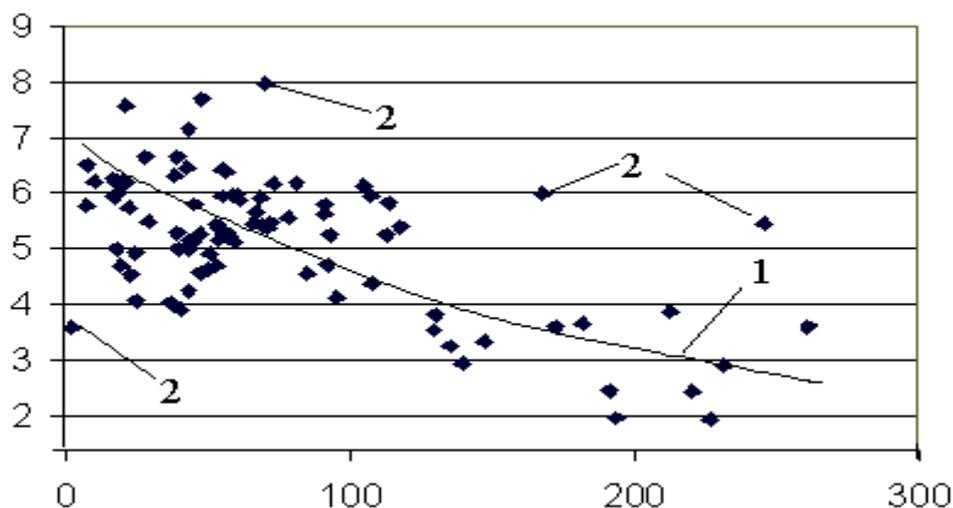
Hydrobionts	Date of the experiments	Correlation coefficient R
Carps	01.09.08 с 20:02 по 6:00	-0.4
Carps	05.09.08 с 20:07 по 9:59	<b>-0.8</b>
Catfishes	09.04.09 с 22:15 по 05:09	<b>0.85</b>
Catfishes	09.04.09 с 14:50 по 16:52	<b>0.87</b>
Catfishes	10.04.09 с 20:00 по 06:09	<b>0.7</b>

Thus, the highest correlation coefficient for carps was -0.8, and it should be noted that these fish tend to decrease their motion behavior during an increase in magnetic

induction variations (as it is evidenced by the sign "minus" of the correlation coefficient between two series). Similar results were obtained in the work [68], and the maximum value of the correlation coefficient was -0.65 there. Picture 4.6 shows the summarized results of the relationship between carps' motion behavior and values of the geomagnetic disturbance coefficient  $K_c$  from the work [68]. The schedule was based on the data of 28 experiments carried out with carps. Each experiment lasted 3 hours. The total number of processed data is more than 5000 values and, accordingly, the same number of the magnetic induction values. The nonlinear nature of the relationship between the average values of motion behavior and intensity of geomagnetic disturbances was established (see picture 4.7).



Picture 4.6 – An example of the relationship between carps' motion behavior and geomagnetic disturbances (the experiment numbers are indicated in the following order: to a point – the experiment number, after the point – the number of a piece of the series).



Picture 4.7 – The nature of the relationship between motion behavior and geomagnetic disturbances. The y – axis – motion behavior, the x - axis – scale of the geomagnetic variations (nT). Designations: 1-approximating curve, 2-overshoot points, tested by the metrological criterion of "gross errors".

The dependence in picture 4.7 shows the absence of any univocal energy (amplitude) "windows" in addition to the revealed nonlinearity of the connection between motion behavior and geomagnetic disturbances [46]. The decline in the motion behavior values in the range of 120-130 nT is probably related only to a limited amount of data.

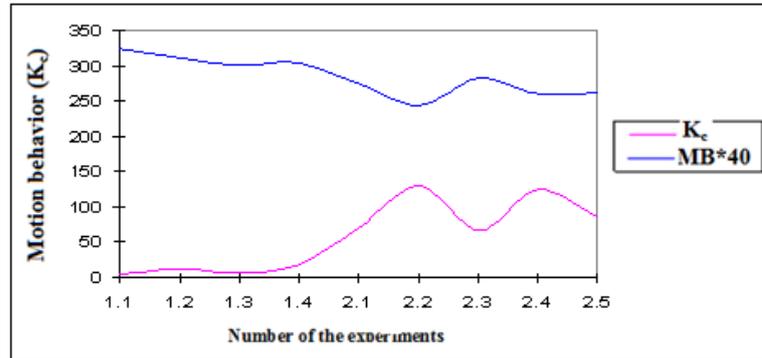
Nevertheless, the univocal determination of the presence or absence of amplitude "windows" is very important, as in their presence it is necessary to assume some quasi-resonant physical mechanism of perception of electromagnetic disturbances, which is considered, for example, in the work [53].

The effect of geomagnetic disturbances on catfishes (*Corydoras aeneus*) is significantly different from that which is connected with carps.

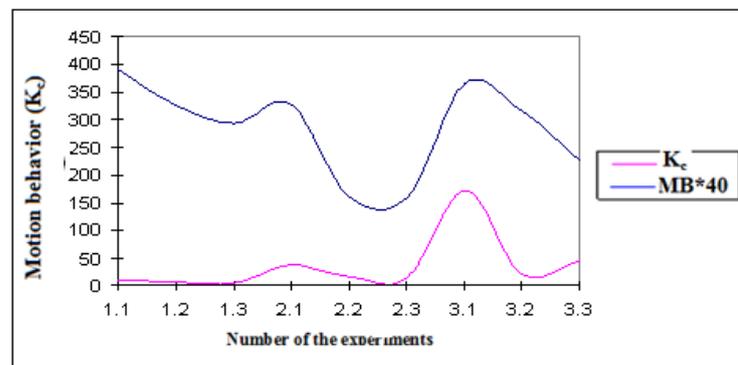
The highest correlation coefficient in the case of catfishes is equal to 0.87. In this case, the motion behavior of catfishes, in contrast to carps, increases with increasing magnetic induction, this means that fishes become more excited during the transition of the Earth's magnetic field from a calm state to perturbed one.

At the same time, neither carps nor catfishes could show any premonition, but the reaction of these fishes to geomagnetic disturbances is evident. Pictures 4.8 and 4.9 show

the graphs of the motion behavior dependence on the range of the induction variations that fully confirm all the conclusions made earlier. Considering the obtained correlation coefficients, it should also be taken into account that these values were obtained for the rather short series. Respectively, the values themselves could be a bit overstated.



Picture 4.8 – The relationship between carps’ motion behavior and amplitude of the geomagnetic induction (the experiment numbers are indicated in the following order: to a point – the experiment number, after the point – the number of a piece of the series).



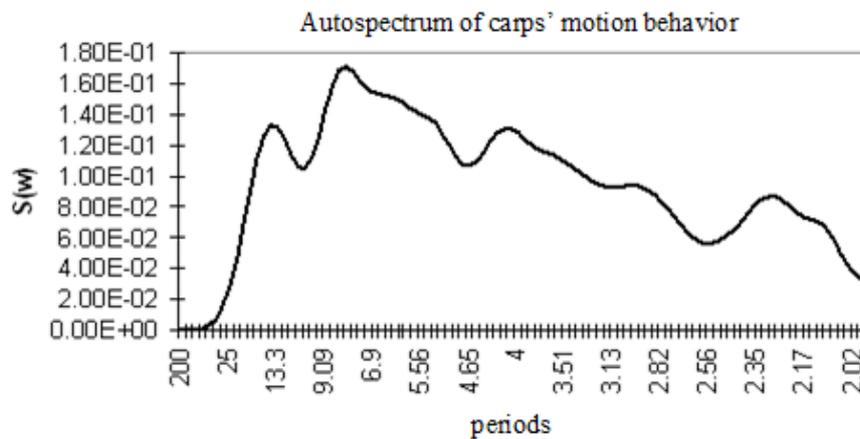
Picture 4.9 – The relationship between motion behavior of catfishes and amplitude of the geomagnetic induction (the experiment numbers are indicated in the following order: to a point – the experiment number, after the point – the number of a piece of the series).

The indices of  $K_c$  were used in the pictures 4.6, 4.8 and 4.9. This is a complete analogue of the generally accepted index  $K$  (calculated with the induction changes for 3 hours of the universal time). The only difference is that the calculations were conducted

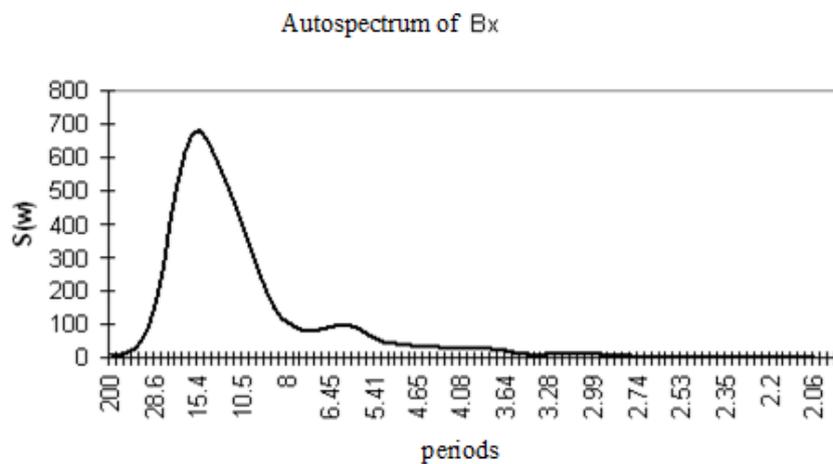
not for changes in the Earth's magnetic field induction, but for specific 3 hours of the experiment.

#### 4.1.3 Evaluation of the relationship between the short-period rhythms of motion behavior and geomagnetic storms

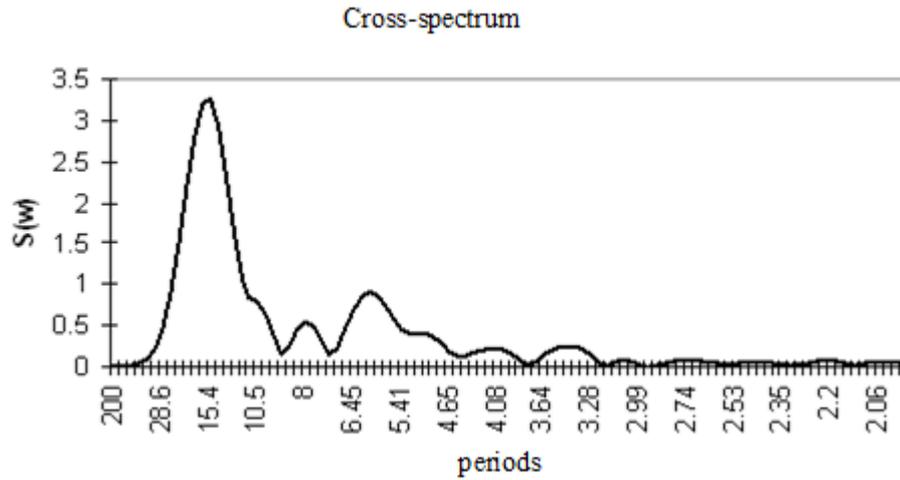
The spectral analysis of the filtered series of motion behavior and magnetic induction gave the following results, which are presented in pictures 4.10 – 4.13.



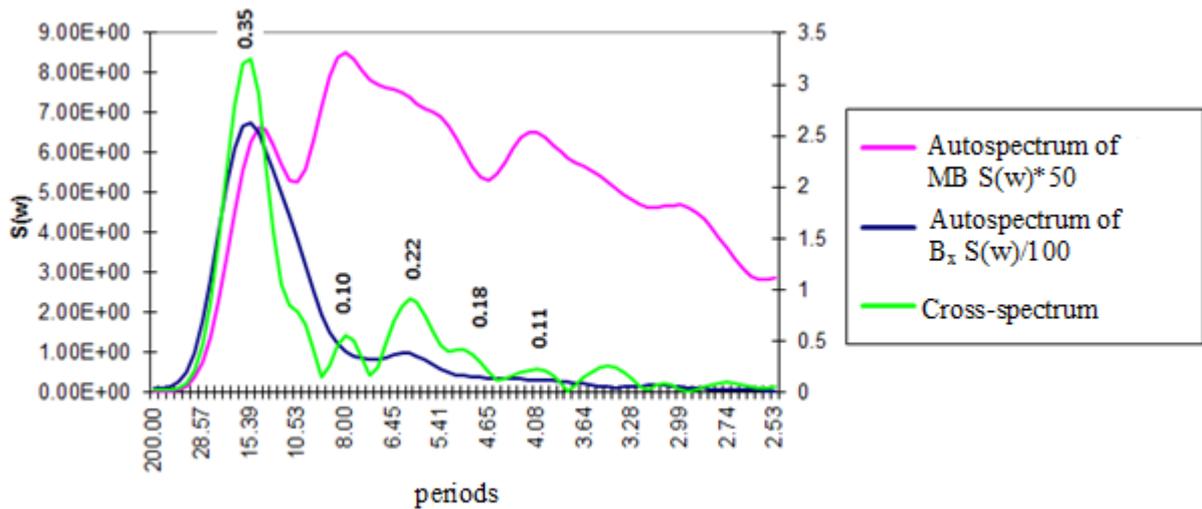
Picture 4.10 – The spectral density of carps' motion behavior (05.09.08).



Picture 4.11 – The spectral density of the magnetic induction variations (05.09.08).



Picture 4.12 – The cross-spectrum (05.09.08).

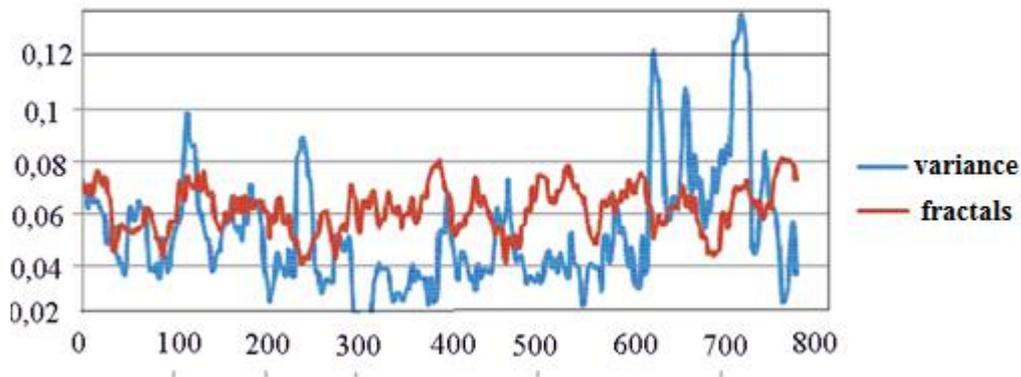


Picture 4.13 – The results of the spectral analysis (05.09.08). The right scale corresponds to the cross-spectrum. Points on the graph are the values of the coherence function.

According to the pictures it can be seen that the groups of periods are about 14-16, 8, 6-5 and 3-4 minutes, and in other experiments we determined a period of about 20-30 minutes. The character of the spectra shows that some periods of motion behavior are generated by external factors, in the mentioned data – by geomagnetic disturbances, in particular, this is the period of 14-16 minutes. The value of the coherence function is very high – up to 0.8. Other periods, apparently, could belong to fish own periods, so they are formed by physiological reasons.

Thus, fish do not live only "in their own world", but they are closely connected with such external to this "world" factors as electromagnetic disturbances.

The fractal analysis confirms the high determinacy of this rhythm (the Hurst coefficient for almost the entire experiment is higher than 0.5) for the periods of 14-16 minutes and some short periods determined by the internal needs of the hydrobionts (picture 4.14).



Picture 4.14 – The motion behavior variance and Hurst coefficient variations for the period of a long experiment with carps (05.09.08). The x-axis shows the time in minutes, y-axis – the current variance of the motion behavior (cond.unit) and the conformed values of the Hurst coefficient divided by 10.

#### 4.1.4 Estimates of the relationship between motion behavior and oncoming of cyclones and frontal sections

The mathematical tool of fractal analysis was used to estimate the relationship between motion behavior and oncoming of cyclones and frontal sections. This method was based on the assumption that fish perceive alternating magnetic fields generated by hydrometeorological processes and begin to move more quickly in a chaotic order. So, the Hurst coefficient values calculated according to the motion behavior can fall below 0.5 ("chaos fall").

In the process of work, the fractal analysis was carried out to identify the degree of fish motion behavior determinacy. In the course of the experiments, the series of the Hurst

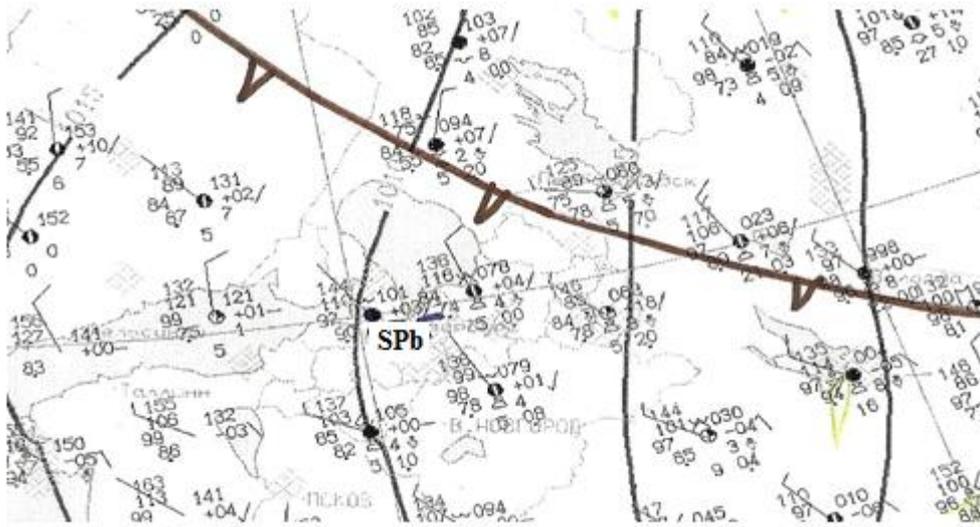
index with a step equal to 3 were obtained. The situations of the "chaos falls", when the H-index became less than 0.5, were the greatest interest to us.

As a result, for each experiment, the points of time of these chaos falls in fish motion behavior were recorded, and then the geomagnetic and meteorological conditions were estimated at that time.

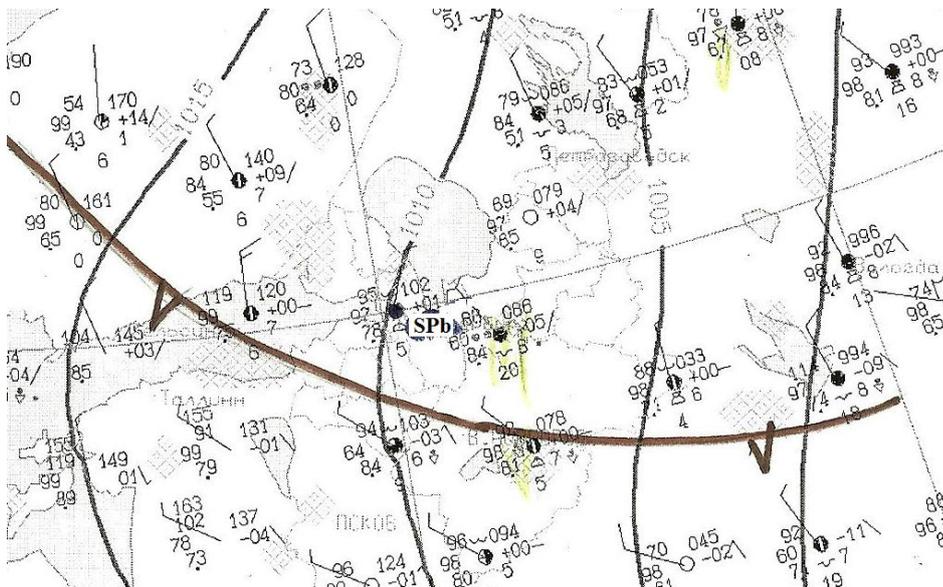
Earlier it was stated that in general, the geomagnetic situation during the experiments can be characterized as calm, so the main attention was paid to the study of surface weather maps with the positions of the cyclone centers and fronts. The detailed analysis took into account the fact that the passage of cyclones or fronts significantly changed the natural electromagnetic field that hydrobionts react to. Also, with the help of this kind of analysis, the question of a possible premonition of dangerous hydrometeorological phenomena by fish can be considered.

For this purpose, the values of motion behavior variance were determined with the subsequent statistical processing in conjunction with the data series of the Hurst index, namely, the correlation coefficient between two series was determined, followed by making plots of the necessary dependencies. In general, it can be concluded that there is some connection between two characteristics, but considering that the variance and Hurst index differ fundamentally in their parameters, the obtained dependence is not clearly shown in the graphs.

The analysis of the surface weather maps allowed to determine the time of oncoming of cyclones or fronts and relate it to the fish behavior on the basis of motion behavior. In general, it can also be concluded that a good reaction of fish to the system of quasi-steady fronts exists; in some cases it is even possible to make an assumption about fish presentiment of the front 3-6 hours before. Pictures 4.15-4.18 show the synoptic maps for one of the experiments with the carps, which lasted from 01:23 to 9:00 31.08.08. Picture 4.19 shows the variations of the Hurst index during this experiment.



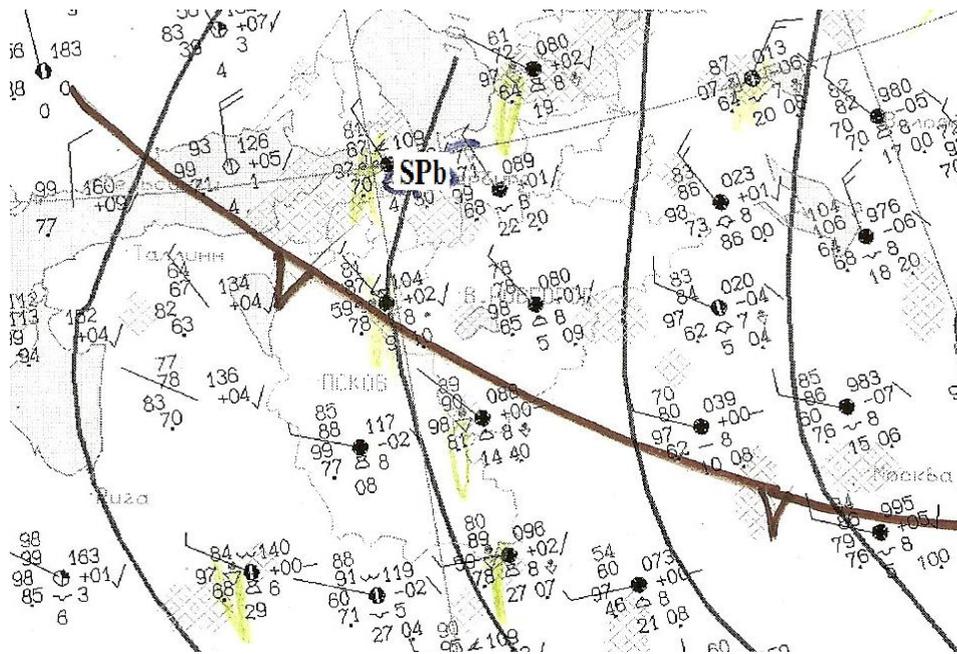
Picture 4.15 – A synoptic map under the date of 18 (22):00 30.08.08.



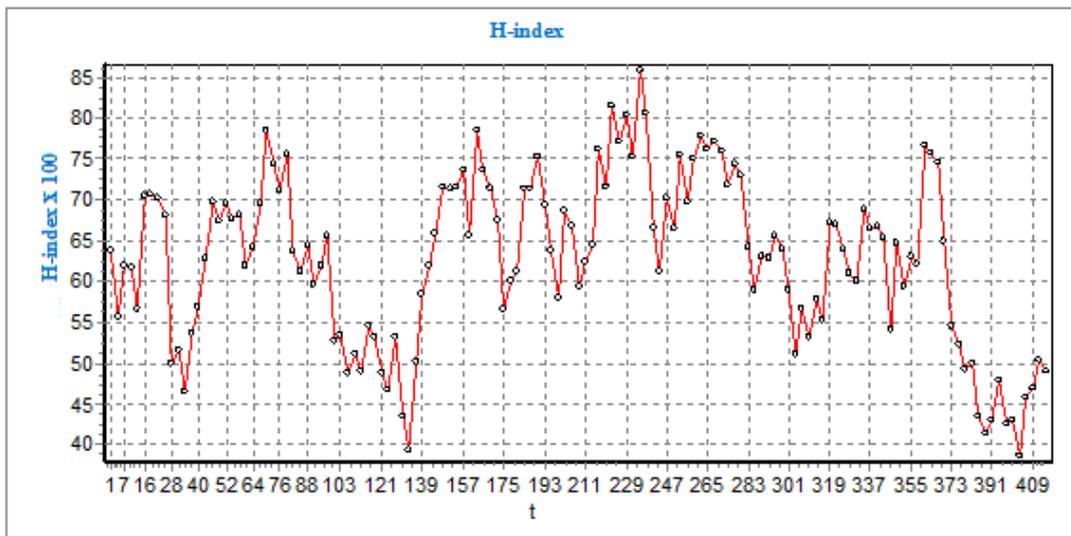
Picture 4.16 – A synoptic map under the date of 21(01):00 30.08.08.



Picture 4.17 – A synoptic map under the date of 00(04):00 31.08.08.



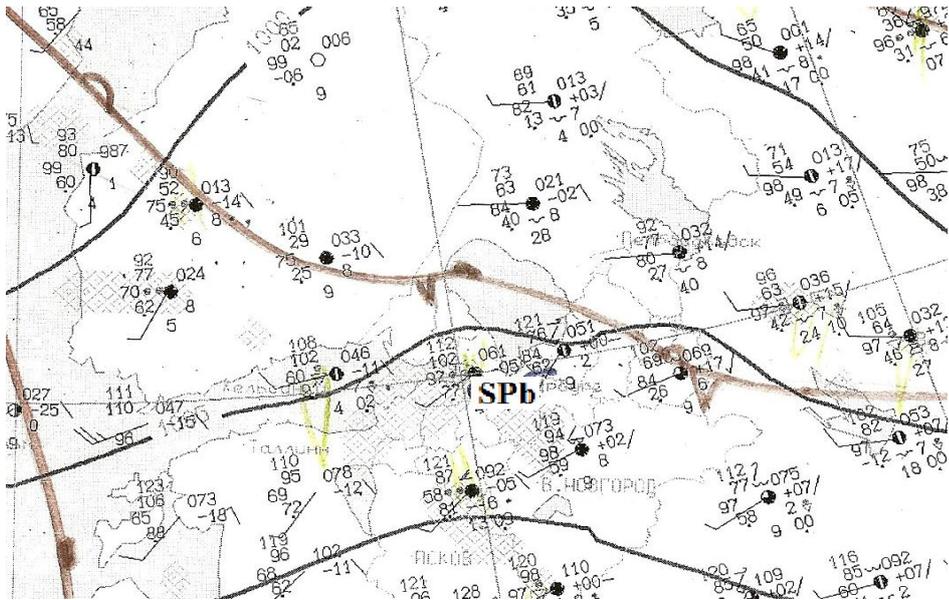
Picture 4.18 – A synoptic map under the date of 03(07):00 31.08.08.



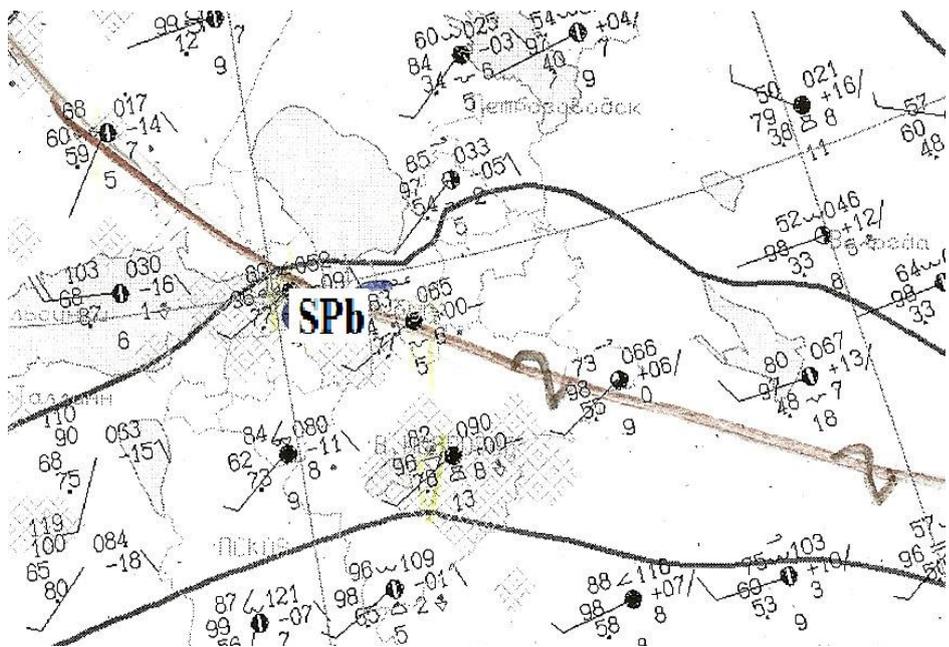
Picture 4.19 – Variations of the Hurst index during the experiment 31.08.08 (the y-axis – values of the Hurst index, multiplied by 100; the x-axis – time from start of the experiment in minutes).

From the graph 4.19 it is evident that there are two significant dips (121-133 and 385-409 min). If we compare the time of "chaos fall" in the motion behavior with the time of the cold front passage, we can conclude that the first dip is the result of a possible premonition, and the second – a possible reaction to the front passage.

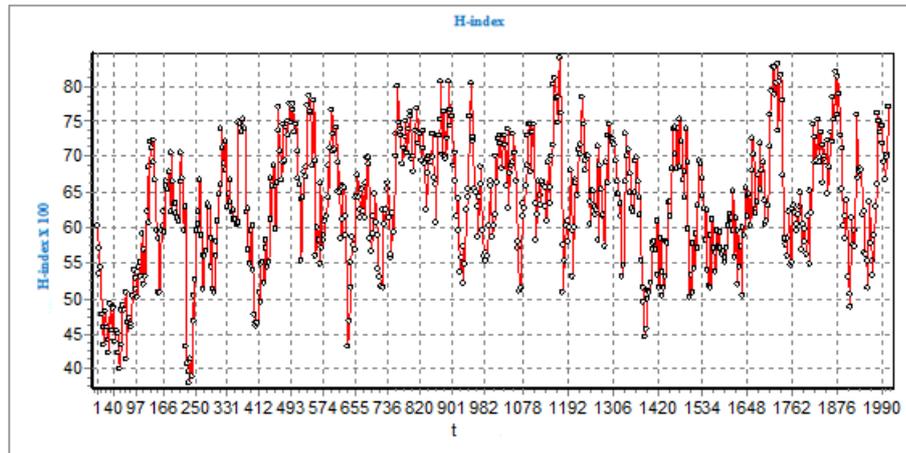
An interesting meteorological situation was observed during the daily experiment. The maps (pictures 4.20-4.21) that correspond to the time interval of the first dip in the fish behavior (picture 4.22) with a duration from 88 to 103 minutes. Therefore, it can be concluded that the fish could have a presentiment of the oncoming of the occlusion front.



Picture 4.20 – A synoptic map under the date of 18(22):00 13.10.08.



Picture 4.21 – A synoptic map under the date of 21(01):00 13.10.08.



Picture 4.22 – The Hurst index variations during the daily experiment from 23: 50 13.10.08 to 10: 00 15.10.08.

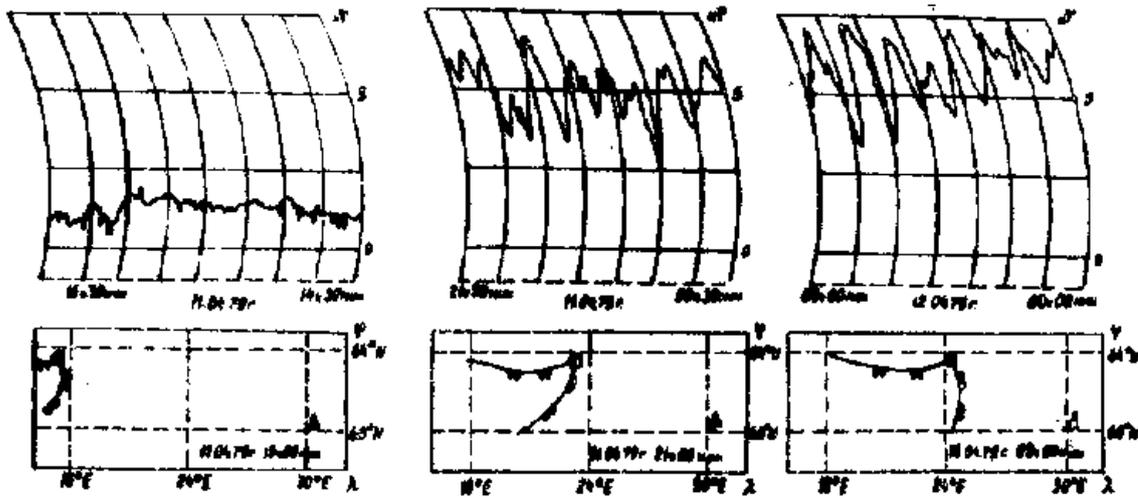
However, the significant dips in the Hurst index curve were associated with the weather conditions not in all cases. So, for example, there were several considerable drops in the fish behavior in the experiments 11.09.08 and 12.09.08, but the weather conditions were good (there was an anticyclone), also no significant geomagnetic disturbances were noted for those periods. The only possible explanation for such dips in the Hurst index curve may be the presence of some random unaccounted factors, the effect of which was not studied in this work.

## 4.2 Catfishes

### 4.2.1 Response of catfishes to hydrometeorological processes

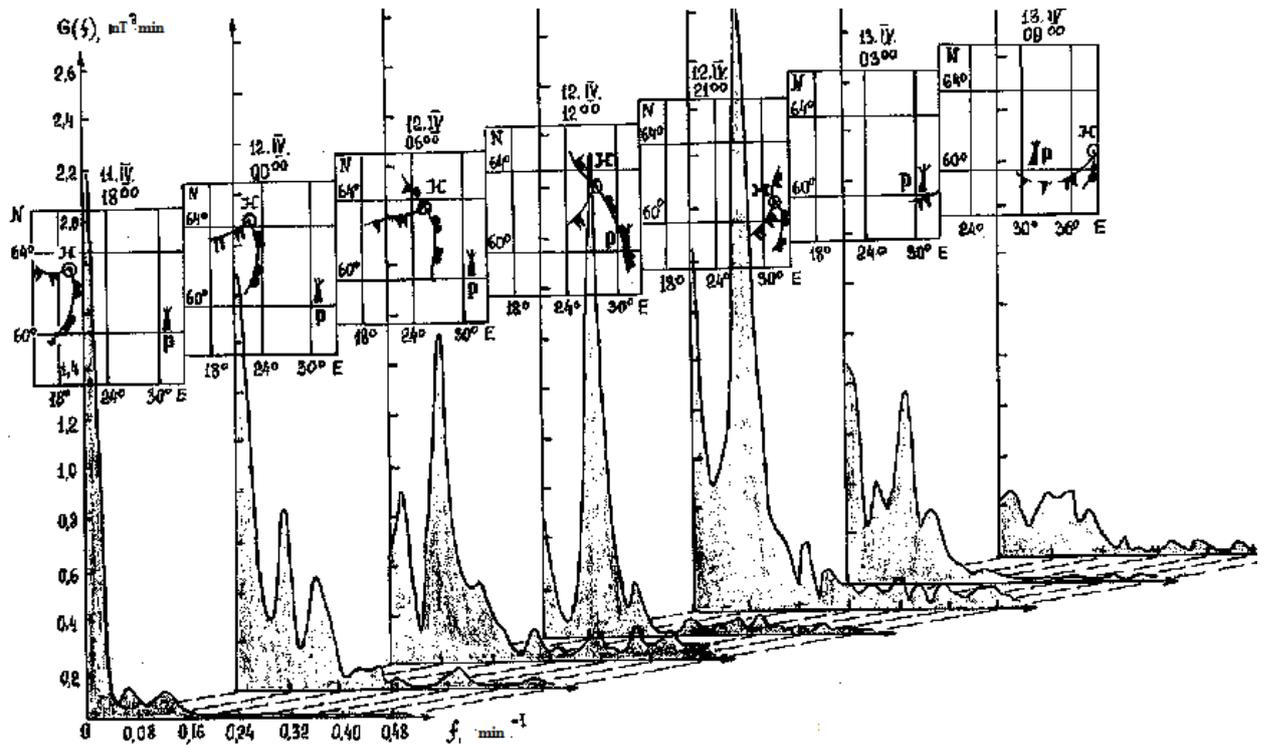
Many dangerous hydrometeorological processes are biologically important for fish, such as waiting for a cyclone and a storm associated with it. In the experiments, special attention was paid not only to the presence of the cyclone, but also to the front passage. The experimental studies [69] of the internal structure of electromagnetic fields generated by cyclones allow us to conclude that the main energy-carrying spectrum is concentrated in the frequency range from 6.5 to 11 Hz with the predominance of oscillations in the region of 7-7.5 Hz.

In addition, the study of the envelope of the carrier signal [70] has shown us that there is an increase in the signal level, which can be considered as monotonic and reach the intensity of about 15 nT at the approach of the cyclone since 1000 km. Against this background, the modulating variations with the periods in the range of 5-20 minutes can be observed (Picture 4.23).



Picture 4.23 – An example of the natural electromagnetic field variations when the cyclone approaches the place of registration (from the work [65]).

Spectral analysis of the data for single cyclones [71] has demonstrated that the power of modulating variations associated with internal gravity waves is inversely proportional to the distance from the observation point to the oncoming cyclone center with two energy - carrying periods of these variations – 5,7 and 12 minutes (Picture 4.24).



Picture 4.24 – The power spectra of the natural electromagnetic field signal at different distances from the cyclone (from the work [1]).

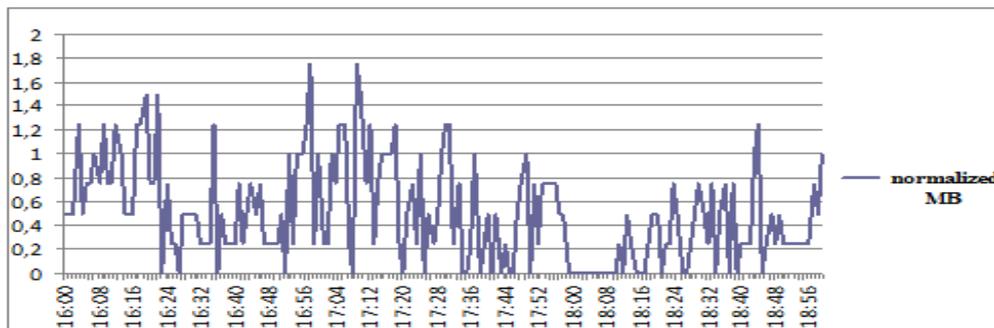
The experiments were conducted in order to test the assumption of the biological importance of hydrometeorological processes and study the hydrobionts' reactions to the presentation of electromagnetic field. The laboratory screening was not conducted, thus, we had to take into account the external field. In particular, we controlled geomagnetic and hydrometeorological situations, that provided the additional information on the topic of our interest. Then a separate analysis of the data obtained under perturbed conditions was carried out.

The experiment on the presentation of alternating magnetic field, conducted on 17.04.2012 at a frequency of 7 Hz, showed the motion behavior inhibition according to both normalized data of the catfish motion behavior and variance of it (Pictures 4.25 and 4.26). Considering the meteorological conditions at the time of the experiment it was found that such decrease in the motion behavior corresponded to the cyclone passage. Therefore, we repeated the experiment at a frequency of 7 Hz in the absence of the cyclone on 24.04.2012. According to the results of the obtained data, it is evident that

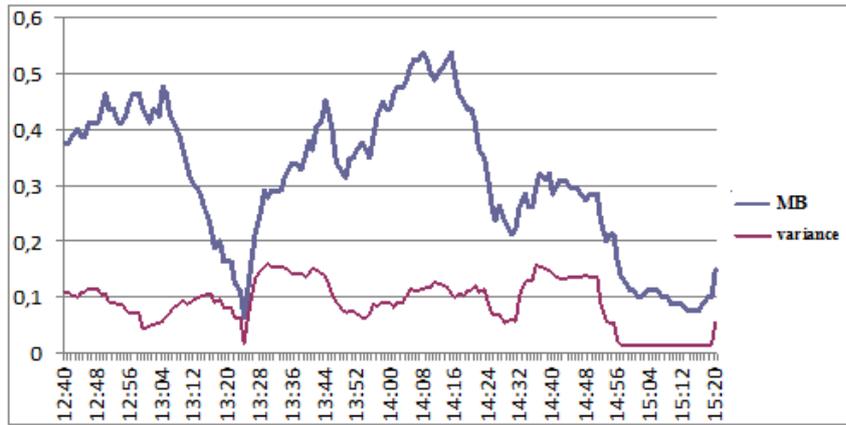
during the repeated experiment at the same frequency the indices of catfishes' motion behavior were higher than ones in the experiment data at the cyclone (Picture 4.27). Thus, on the basis of the accumulated information, it was concluded that the cyclone passage, in general, affects the increase in catfishes' motion behavior. But it should be noted that magnetic field at the frequency of 7 Hz causes a clear positive reaction in catfish. The surface maps are presented in pictures 4.28; 4.29.



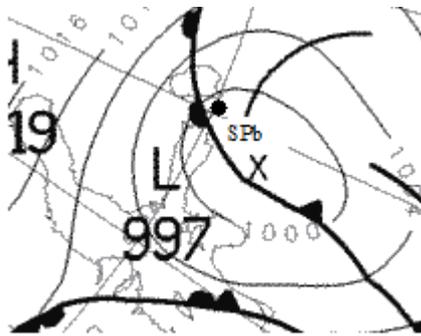
Picture 4.25 – The graph of the changes in average motion behavior of the catfishes and variance at a frequency of 7 Hz (cyclone) (experiment: 17:10 – 18:10).



Picture 4.26 – The graph of the changes in the normalized data of motion behavior during the cyclone.



Picture 4.27 – The graph of the changes in average motion behavior of the catfishes and variance at a frequency of 7 Hz (experiment: 13:40 – 14:40).



Picture 4.28 – A fragment of the surface map of the experiment 17.04.2012 (cyclone).

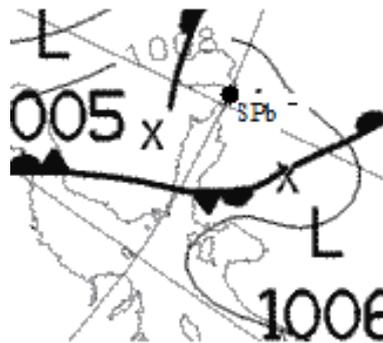
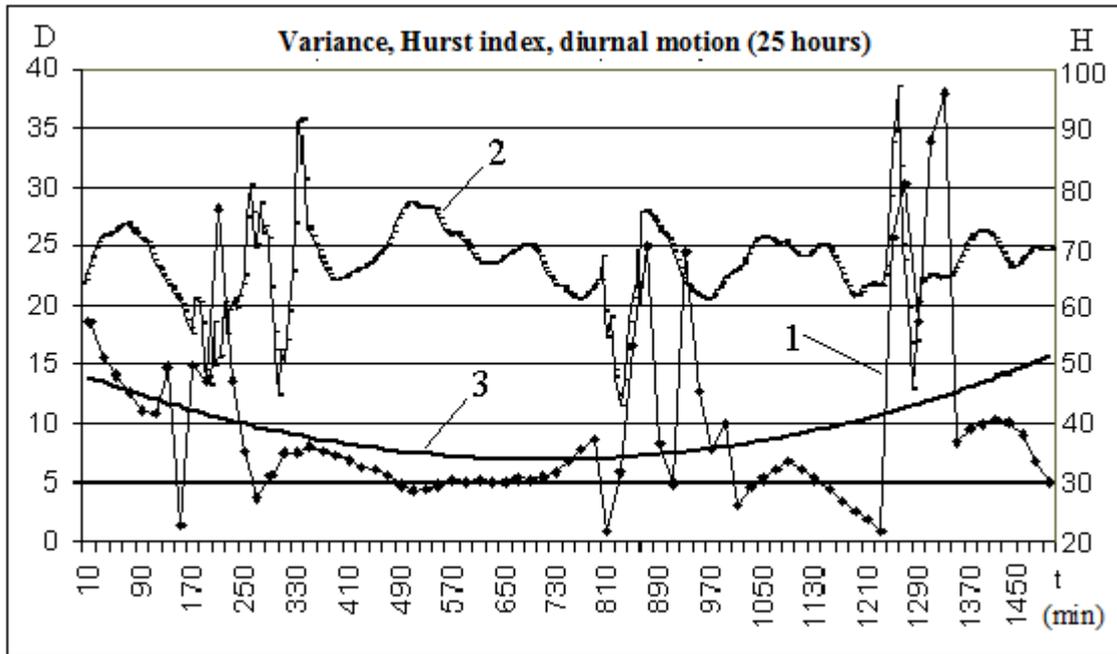


Figure 4.29 – A fragment of the surface map of the experiment 24.04.2012.

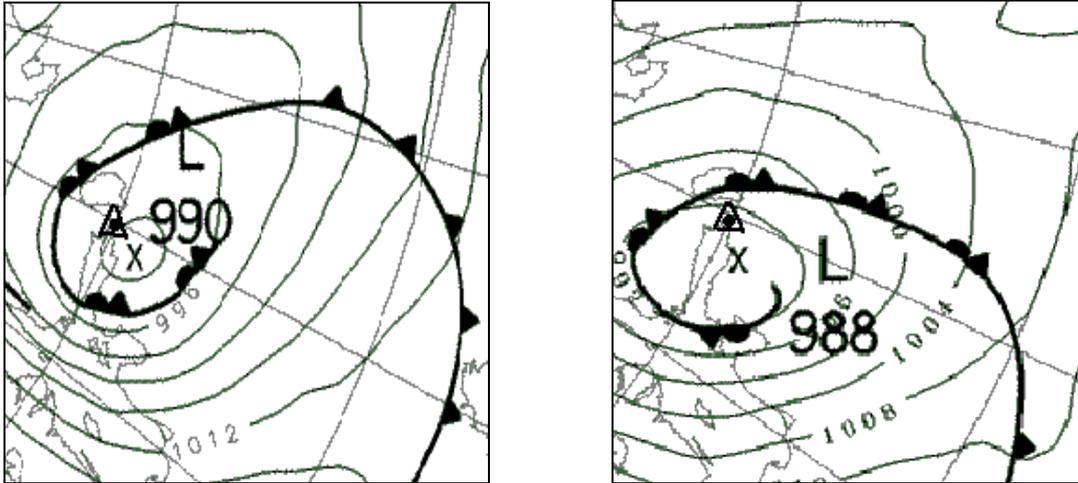
These results are confirmed by the data from [47]. The daily experiment on determination of motion behavior of catfishes (*Corydoras aeneus*) was carried out in this work. The variance of motion behavior and variability of the Hurst index were used as an indicator of the oncoming and passage of the cyclone (Picture 4.30). The specific features

of these characteristics were revealed on the background of the average daily process of motion behavior.



Picture 4.30 – The characteristics of the catfishes' behavior during the passage of a cyclone with a system of atmospheric fronts. 1-behavior variance  $D$ , 2-Hurst index ( $\times 100$ ), 3 – averaged daily motion behavior.

Observations were made during the period of the passage of the cyclone with a frontal section (Picture 4.31). The data on the synoptic situation were taken from a popular German web-site.



Picture 4.31 – The synoptic situation when monitoring the catfishes (*Corydoras aeneus*). On the left – the initial position of the cyclone at the beginning of the observations, on the right – the cyclone position after 12 hours. Triangles with a point – observation points.

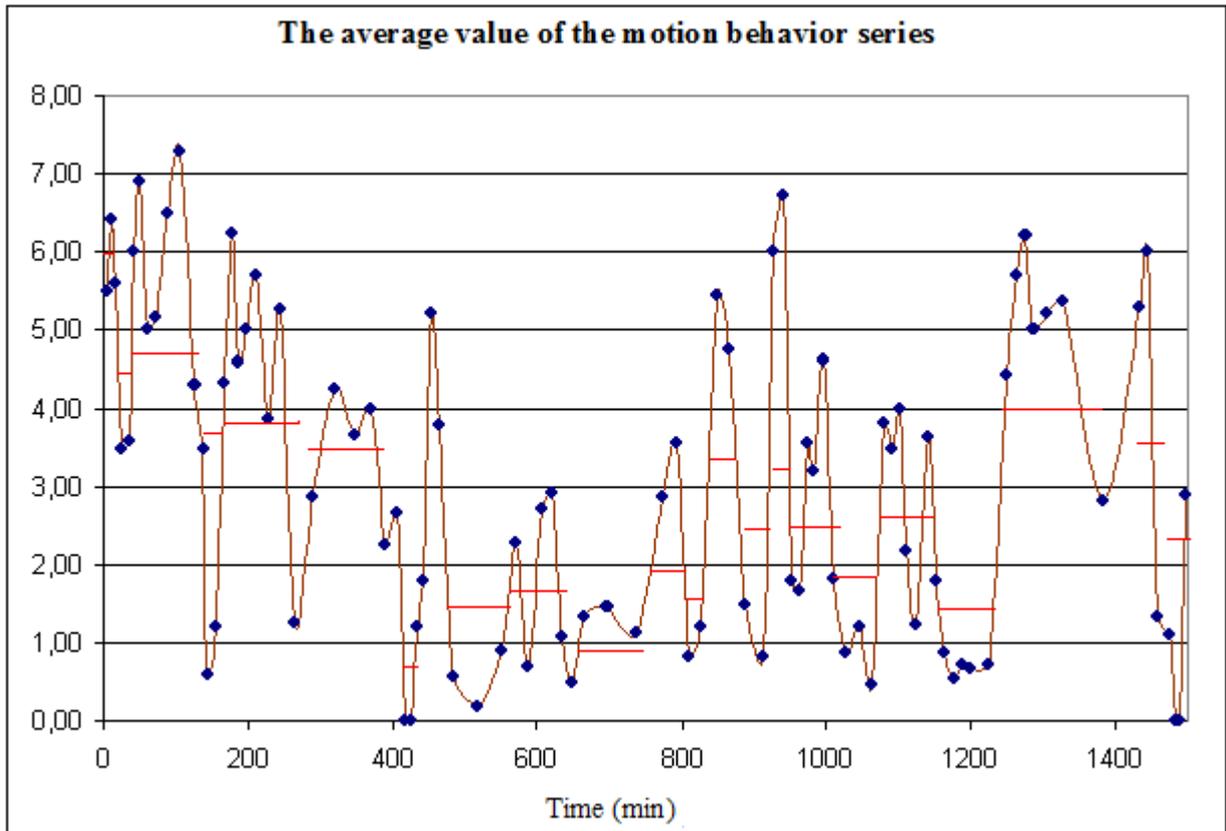
Analysis of these data clearly shows the presence of the catfishes' reactions to the passage of the cyclone and frontal sections. However, the choice of variance as an indicator is not always reliable. The reason is that the variance here is related not only to the "range" of motion behavior variability, but also to the motion behavior intensity, and the decrease in intensity at the same "range" of variability gives an increase in the variance.

In addition, due to the squaring some information about the sign of motion behavior variability gets lost.

The variability of the motion behavior intensity is no less interesting, and perhaps more correct, than variance (see subsection 4.2.2). Using the source data on motion behavior during the performed in the work [47] daily experiment and analyzing the obtained series, breaking it into stationary pieces, it was possible to obtain the following. A decrease in the average value was observed during the experiment 20.04.07 (Picture 4.32). This situation indicates an increase in the variance shown in picture 4.30.

Indeed, the averaged data show that the increase in the motion behavior intensity, as in the case with the variance, is related to the synoptic situation. So the graph consists of some areas that are approximately 150-260 min (1st area), 800-950 min (2nd area) and

1250-1450 (3rd area). Moreover, it should be noted that the 3rd area is much wider than the one distinguished by the variance.



Picture 4.32 – The average value of the catfishes' motion behavior during the diurnal experiment (red lines highlighted the quasi-stationary parts of the series).

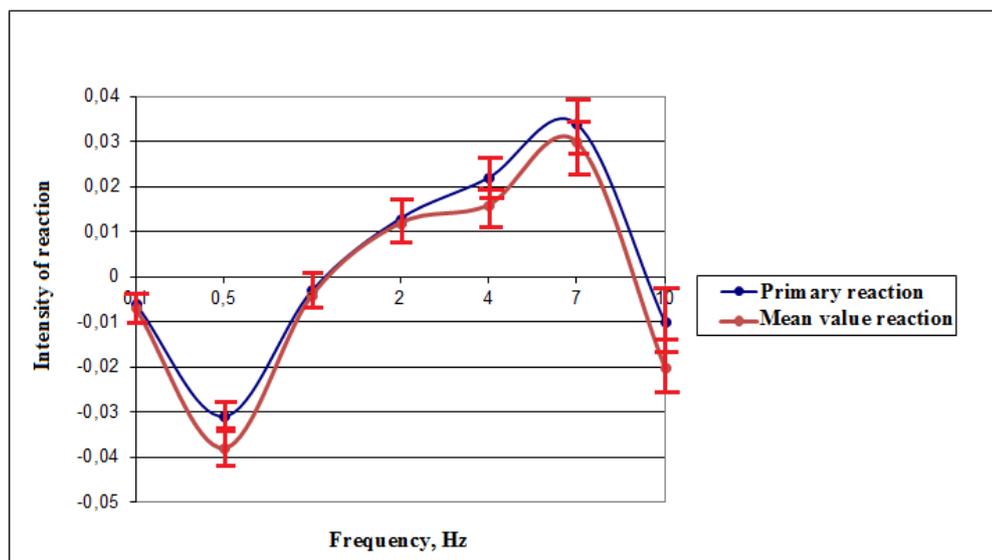
All this means that the average values of motion behavior intensity at least, and maybe even better, reflect the impact of hydrometeorological conditions on fish behavior.

However, we must not average the data at random. It is necessary to find the quasi-stationary areas (fragments), and estimate the average values only for them. This technique was used in the processing of the data of our further experiments. Quasi-stationarity for the determined fragments was estimated only on the average value, as a "narrow sense" stationarity.

#### 4.2.2 Search of the mechanisms of catfishes' perception of some hydrometeorological processes. Sensitivity to alternating electric fields

During the laboratory experiments, the motion behavior series were obtained at different frequencies of the electric field acting on fishes. The data were normalized by dividing the calculated values of motion behavior by the total number of the fishes. The electric field strength (Picture 3.1) was set to 2.7 mV/cm in the facility. The field was formed as homogeneous in the whole basin. The time of the fish adaptation was 20-25 minutes.

Then, for each quasi-stationary part of the series, mean values of motion behavior and variance were calculated. The impact of the electric field with a frequency of 0.1÷10 Hz on the catfishes revealed the following. The reaction of the catfishes to various frequencies was different. The specific "windows" of high sensitivity were revealed in the frequency response (Picture 4.33). The data on the fish reaction rate are given in the table 4.2.



Picture 4.33 – The intensity of the catfishes' reaction (the confidence intervals are highlighted in red and calculated for a confidence probability of 0.95).

Table 4.2 – The intensity of the reaction

Frequency, Hz	Primary reaction	Mean value reaction
<b>0,1</b>	<b>-0,006±0,004</b>	<b>-0,007±0,004</b>
<b>0,5</b>	<b>-0,031±0,005</b>	<b>-0,038±0,005</b>
<b>1</b>	<b>-0,003±0,001</b>	<b>-0,004±0,001</b>
<b>2</b>	<b>0,013±0,005</b>	<b>0,012±0,005</b>
<b>4</b>	<b>0,022±0,005</b>	<b>0,016±0,005</b>
<b>7</b>	<b>0,034±0,005</b>	<b>0,03±0,005</b>
<b>10</b>	<b>-0,01±0,005</b>	<b>-0,02±0,005</b>

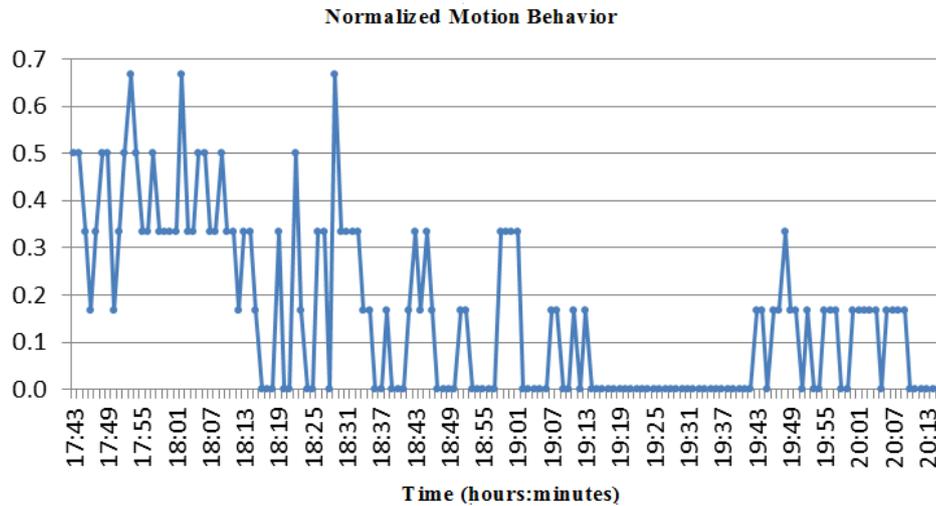
The frequency "windows" of the higher sensitivity in picture 4.33 are distinguished in the range of approximately 0.2-1 Hz and 2-8 Hz with the extreme values of 0.5 Hz and 7 Hz. The first area is characterized by the reaction of motion behavior inhibition, the second area, on the contrary – by the reaction of innervation. The first "window", apparently, should be associated with some physiological characteristics, and the second – with the tasks of obtaining information about the environment.

It should be noted that the frequency characteristic of electrical sensitivity is close to the determined one relative to the Japanese dwarf catfishes (Picture 1.7). However, in spite of the fact that the areas with the extreme value of 7 Hz coincide, the significant differences in the "physiological area" are also visible. It is not so clearly distinguished in the picture 1.7. Perhaps, this could be due to the fact that different types of catfishes were studied.

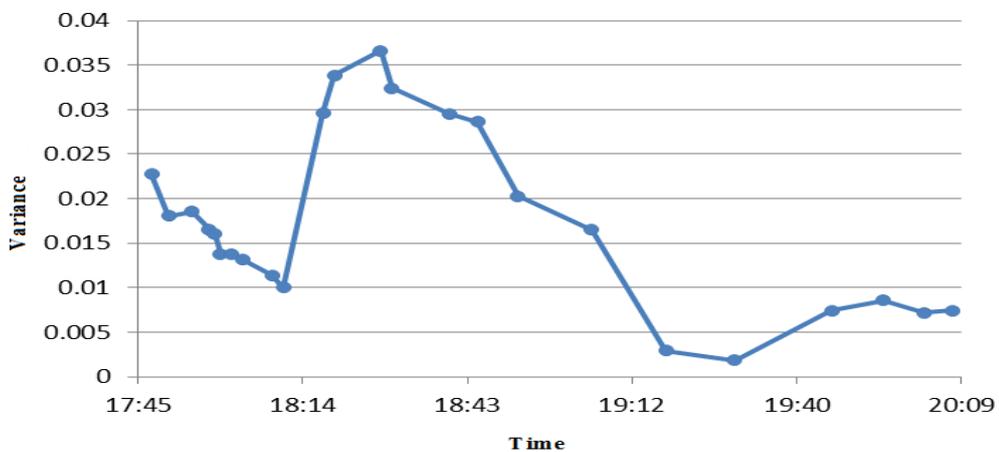
In processing the data we distinguished: the primary reaction (the difference between the intensity value of motion behavior after the start of the reaction and the background intensity), and the mean value intensity (the difference between the mean value of motion behavior intensity for the period of exposure and the background value). An example of a motion behavior series, normalized by the number of the fishes in the aquarium, is shown in picture 4.34. The variance of the motion behavior series for the same experiment is demonstrated in picture 4.35.

There is some adaptation of the reaction to the action of the influencing factor in the second selected "window" and some strengthening of the reaction in the first "window".

Apparently, these differences have an explanation, but in this work it has not been studied in detail.



Picture 4.34 – The normalized motion behavior variability at a frequency of 4 Hz (experiment: 18:16-19:16).



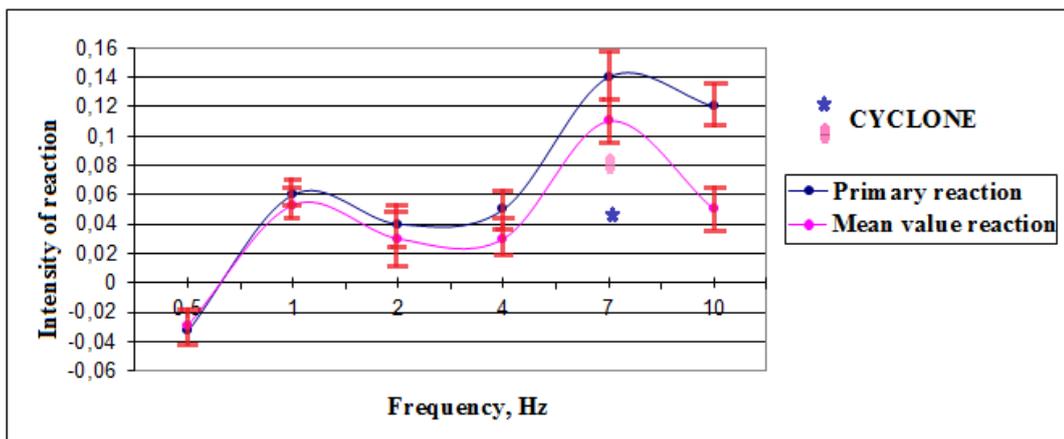
Picture 4.35 – The variance of the motion behavior series at a frequency of 4 Hz.

#### 4.2.3 Sensitivity of catfishes to alternating magnetic fields

The experiments were carried out at the facility with the excitation solenoid (Pictures 3.2 and 3.3). The diameter of the solenoid was much larger than the transverse diameter of the basin, so the created alternating magnetic fields were almost

homogeneous. The induction was set to 100 nT, that was controlled by measuring instruments.

The results were processed by analogy with the processing of the experimental data on the effects of an alternating electric field. According to the magnetic field influence, the nature of indirect perception at various frequencies is different. The fields in the area of 2÷4 Hz leave the fishes almost indifferent to the effects. At the same time, the frequencies of 1 Hz and 7 Hz attract the fishes (Picture 4.36). The intensity of fish reaction is shown in table 4.3. The change in the normalized motion behavior at the frequency of 1 Hz and the variance of the motion behavior series at the frequencies of 1 and 7 Hz are demonstrated in pictures 4.37-4.39.



Picture 4.36 – The intensity of the reaction.

Table 4.3 – The intensity of the reaction

Frequency, Hz	Primary reaction	Mean value reaction
0,5	-0,033±0,007	-0,029±0,009
1	0,06±0,01	0,053±0,009
2	0,04±0,008	0,03±0,01
4	0,05±0,01	0,03±0,01
7	0,14±0,02	0,11±0,02
7 (cyclone)	0,05	0,08
10	0,12±0,02	0,05±0,019

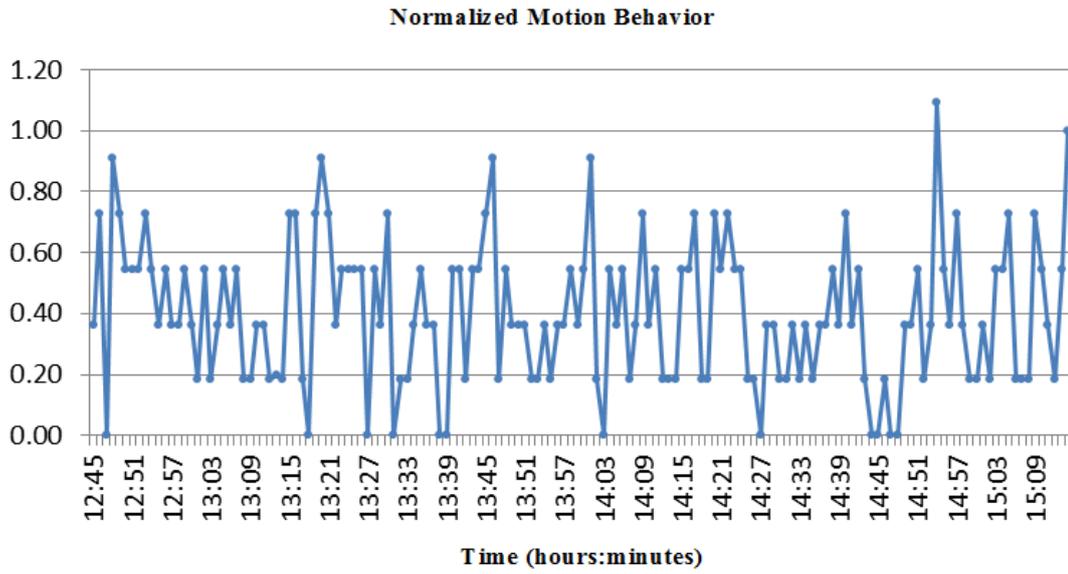
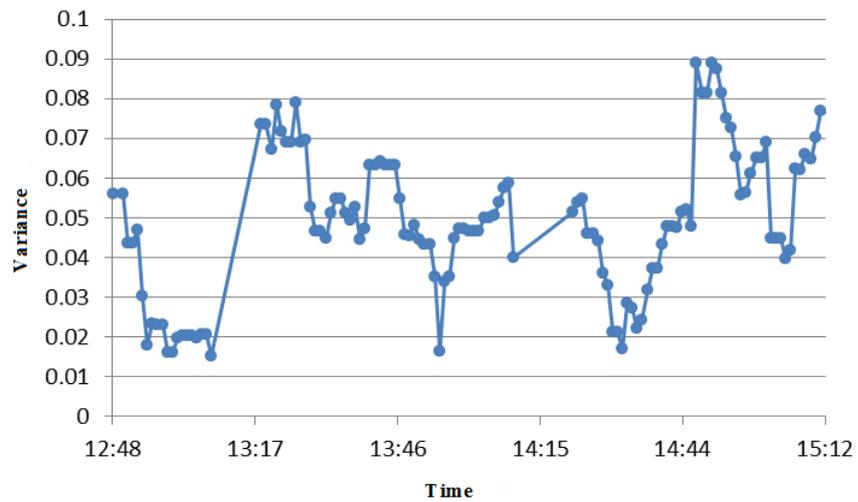
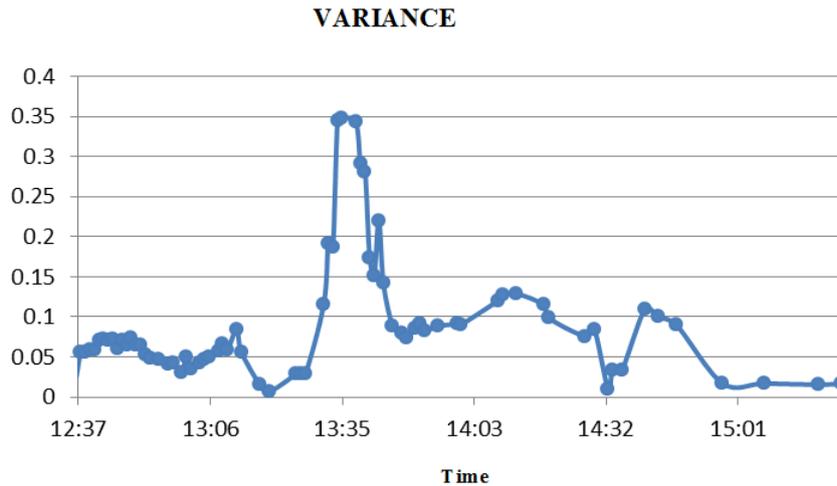


Figure 4.37 – The normalized motion behavior variability at 1 Hz (experiment: 13:15 – 14:15).



Picture 4.38– The variance of the motion behavior at a frequency of 1 Hz.



Picture 4.39 – The variance of the motion behavior at a frequency of 7 Hz (experiment: 13:30 – 14:30).

## 4.2 Conclusions

The obtained data show that:

- the reaction to the oncoming and passage of dangerous hydrometeorological processes is revealed in statistically significant variability of motion behavior characteristics of catfishes; the motion behavior intensity, variance and fractal dimension (through the Hurst index) can be used as indicators of variability;
- the reaction of catfishes is formed under the influence of extremely low-frequency band electromagnetic fields generated in the atmosphere in the area of cyclones and frontal sections and propagating forward in the direction of their movement;
- the motion behavior reaction of catfishes to different frequencies of electromagnetic fields generated by hydrometeorological processes is differently directed, and even the frequency shift of 1 Hz is very important and can change the sign and value of the reaction;
- in addition to the reaction itself, the delay time of this reaction is of great importance, which is irregularly related to the influencing frequencies. A delay time of reaction (latent periods) is discussed in more detail in subsection 4.4.

### 4.3. King crabs

#### 4.3.1 The influence of magnetic storms on King crabs' motion behavior. Effects of premonition

##### *The background characteristics of crab's motion behavior.*

Invertebrates do not have special electric receptors, although in the process of evolution they have been exposed to the Earth's magnetic field variations. The discovery of biogenic magnetite in many animals was the impetus that provided new insights on the problem of magnetic perception [72]. In marine mammals, fish, turtles, birds, insects, crabs magnetic particles are surrounded by nervous tissue, confirming the interaction between the particles and brain. The scientists are interested in establishment of the ability of certain animal sensory structures to perceive the magnetic field, as it would help better study migration behavior and answer many questions related to orientation in space. At present, we have to use only the experimental data as basis.

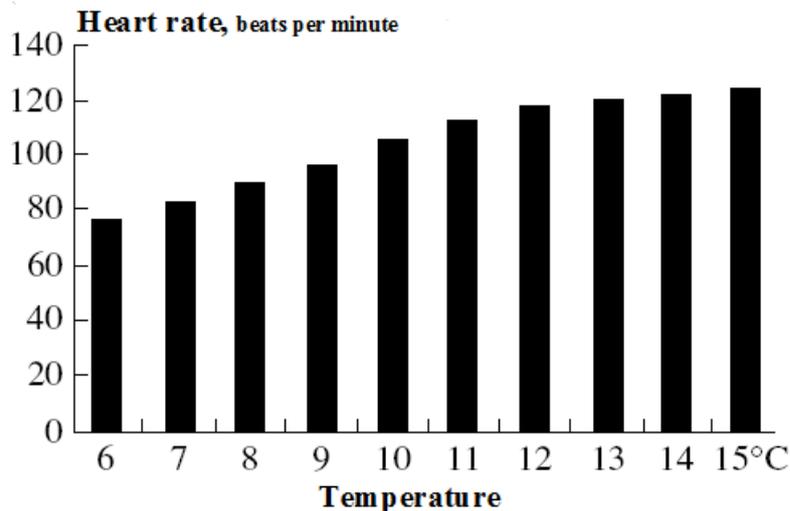
Crabs face rapid changes in seawater temperature during seasonal migrations. Studies on the impact of water temperature on living activity of King crabs, moved in the waters of the Barents Sea, are virtually non-existent, whereas these data would help to broaden the understanding of the mechanisms of marine invertebrate adaptation in high-latitude seas. The need for experiments is confirmed by the fact that the depletion of crabs in the Far East has led to a reduction in its reserves in the region. And it has given an idea of reproductive aquaculture to the scientists.

A work was carried out to identify the optimal temperature conditions for the various periods of ontogenesis of King crabs [73], which may be useful for their cultivation in the Arctic region.

The experiments were performed on 19 specimens of crabs aged 4-5 years. Motion behavior and heart function were used as a criterion of the animals' living activity. The registration of crabs' motion behavior was performed by means of the strain-gage sensor, which through a bridge circuit connected to the ink-recording device N-338 4P.

This work was divided into two stages. At the first stage, the daily rhythm of animal activity was studied under natural lighting and constant water temperature of 5-6 °C. During the experiment, from May to October 2007, a significant decrease in the King crabs' motion behavior was obtained in the night period of their life. The motion behavior of crabs was the most clearly determined during the polar night.

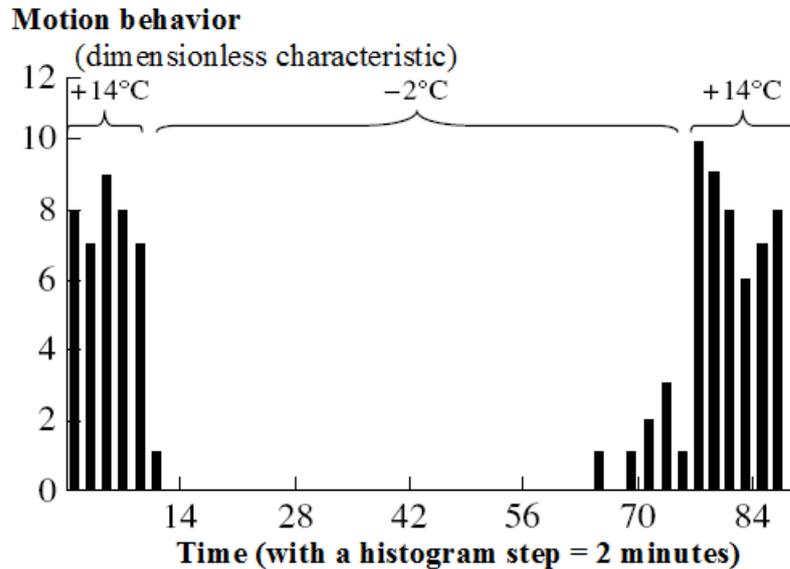
It was found that heart rate of the adapted crabs in a calm state in the experimental aquarium remained unchanged, and was  $76 \pm 1$  beats per minute. With a slow, for two hours, water heating to 15 °C, the heart rate naturally increased to  $123 \pm 2.6$  beats per minute (Picture 4.40). It may be concluded that the crab reacted to each degree of change in ambient temperature by changing the heart rate.



Picture 4.40 – Temperature effect on the heart rate of King crabs (from the work [73]).

In the work [73] the reactions of King crabs to a sharp change in the temperature of the surrounding water environment were revealed. Two containers were set in the laboratory in order to do this. One of the containers contained water heated to 14 °C, and in the other container water was cooled to -2 °C. The crabs were quickly transplanted from one container into another. The King crabs' motion behavior was recorded during the experiment. The results of the experiment have shown that those crabs that were in the water with temperature of -2°C for one hour, remained immobile. When the crabs began to

move, they were placed in the container with warm water, where they showed high motion behavior (Picture 4.41).



Picture 4.41 – Effect of a sharp temperature split on crabs' motion behavior (from the work [73]).

Thus, it was found in these experiments that the King crabs, moved to the Barents Sea, survive temperature changes in 16 °C. This shows that in the process of long-term acclimatization of King crabs in the Barents Sea these animals have developed some extra adaptation mechanisms. The results confirm that King crabs are highly resistant to temperature changes, and that this species can be successfully used in sea-farming in the North.

Interesting data that help to identify the spectral features of King crabs' motion behavior were obtained by Bekhteva V. V. [74]. Instead of the expected periods (daily, semidaily, etc.), the strongly shifted periods were observed. At the same time, these features had no connection with tidal processes. The expected daily period appeared to be approximately 16 hours (980 min), and semidaily one was approximately 10 hours (603 min). Shorter periods were also significant – 490, 436 and 373 min. Level of significance of the identified spectral peaks were not more than 0.1. The calculation of the fractal

dimension has demonstrated high determinacy of these periods (the Hurst index was 0.55-0.9).

*The detection of crab reactions to geophysical and hydrometeorological processes.*

In addition to the described experiments the scientific works on the experimental basis of the Murmansk Marine Biological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences were conducted to determine King crabs' reaction to geomagnetic disturbances (magnetic storms). The experiments are described in detail in the source [58].

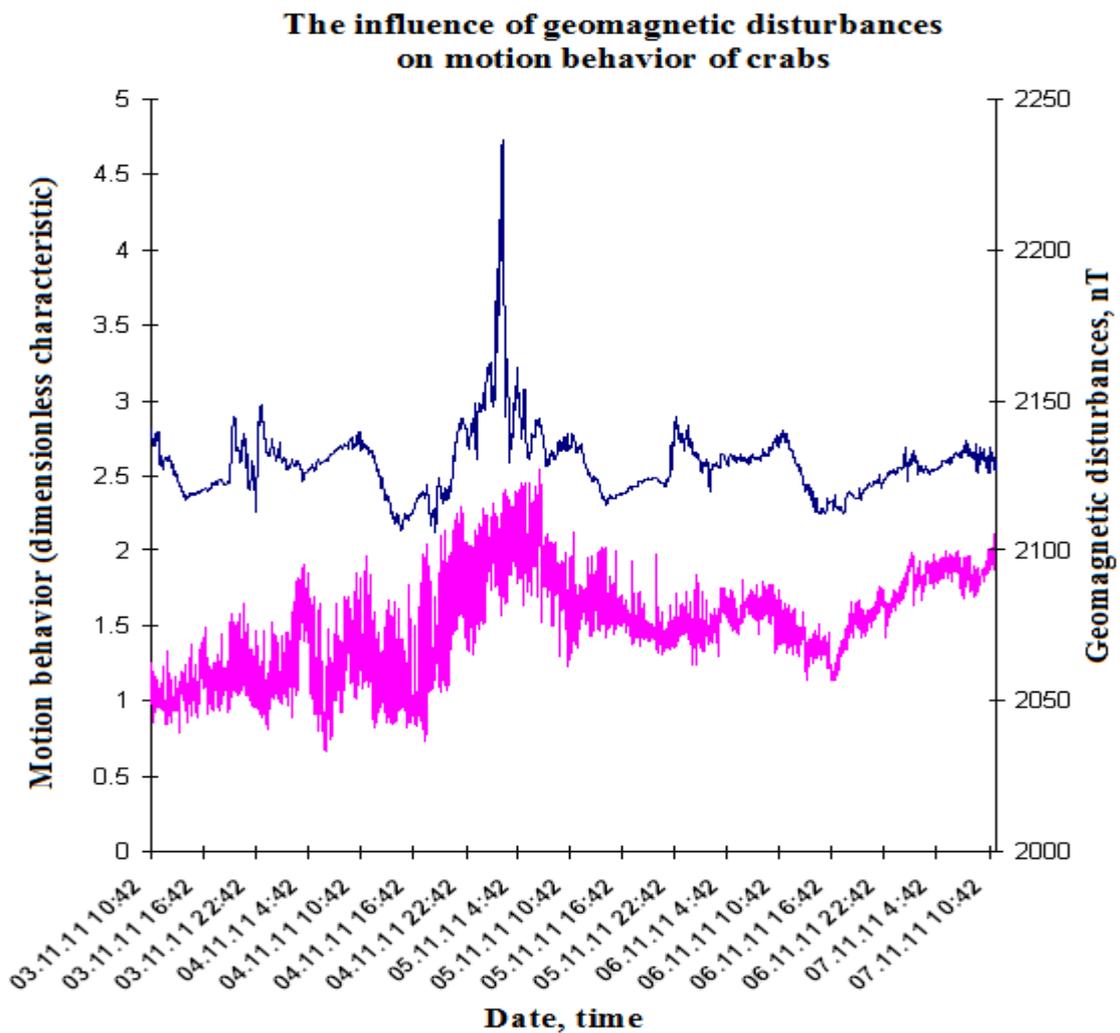
These experiments were also carried out under natural lighting with King crabs aged 4-5 years. As a criterion for crabs' living activity, their motion behavior was also used, because all crab sensory systems are linked to muscles. The crabs' motion behavior was studied with a special facility that contained a kinematic node connected to the crab and strain-gauge sensor, a converter into a modulated voltage of direct current, analogue-to-digital converter and recorder in the form of personal computer. The facility is described in subsection 3.1.4 in more detail. The amplitude of disturbances in the magnetic induction units (nT) from the data of the Finnish Sodankylä Geophysical Observatory was used to estimate geomagnetic disturbances.

The analysis of natural disturbances of the Earth's magnetic field influence on crabs was carried out by comparing the values of motion behavior with the minute data of the geomagnetic disturbance index (Picture 4.42). The geomagnetic field component on the y-axis (the axis is directed from the West to the East) was used for plotting. The experiment with crabs was conducted from 4 to 7 November 2011 in the background with a time resolution of 1 minute.

The picture shows that the crab reaction to changes in the geomagnetic field variations (from 4 to 5 November) is a bit premature – about an hour before the storm starts, the values of crab motion behavior begins to grow, but they have reached the maximum after a peak value of the magnetic storm. Having reached the maximum the values of motion behavior fall dramatically, and the crab gradually "calms down", in other words, the crabs' motion behavior becomes more uniform.

Thus, King crabs' motion behavior accurately reflects changes in the Earth's geomagnetic field. The premature reaction suggests the presence of crabs' presentiment effects.

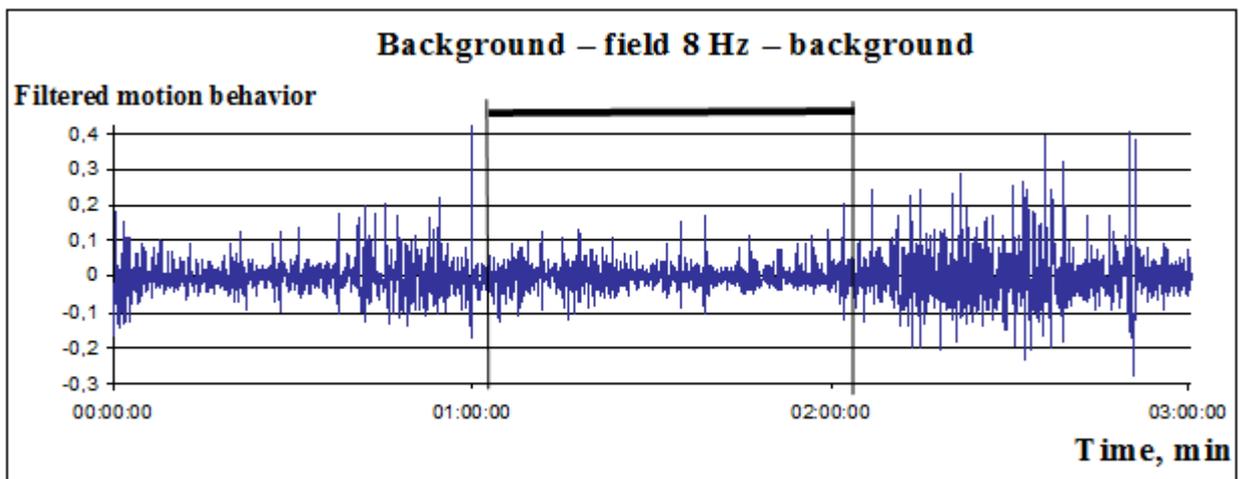
It should be noted that there is nothing especially unexpected. In particular, according to the available data, the effect of "premonition" is also registered among some people [75].



Picture 4.42 – Crab reaction to a geomagnetic storm. The upper record is the y- component of geomagnetic disturbances (right axis), the lower record is motion behavior of the crabs (left axis).

*The impact of artificial alternating magnetic field.*

For the impact of artificial alternating magnetic field, the experimental aquarium with crabs was placed in a solenoid, through which current of extremely low frequency was passed at discrete frequencies. The frequencies were selected from 0.1 Hz to 15 Hz. The magnetic field in the solenoid and, accordingly, in the basin was calculated in relation to the current strength. Each experiment, as in the case of hydrobionts, lasted about 3 hours: the 1st hour is referred to background recording, the 2nd hour – direct influence of artificial alternating magnetic field with a certain frequency and the 3rd hour – repeated background recording. The record of the crabs' motion behavior was conducted with a resolution of 1 second [58]. Picture 4.43 shows an example of changes in the crabs' motion behavior variance during the experiment at 8 Hz. The filtered series of motion behavior were used in this work, where Potter's filter was applied. It can be noted that the impact of 8 Hz creates a reduction of motion behavior variance values. This can probably be related to geophysical factors.



Picture 4.43 – The nature of the crabs' motion behavior variance changes during 8 Hz field influence, experiment 2011.

In order to obtain the dependence of the crab motion behavior on frequency of the impacting field based on the results of experiments with crabs, such characteristics as reaction and variance variability of the crabs' motion behavior, connected with the

presentation of alternating magnetic fields, were obtained at each frequency. According to the calculated data, the graphs showing the obtained dependences are plotted (Picture 4.44).

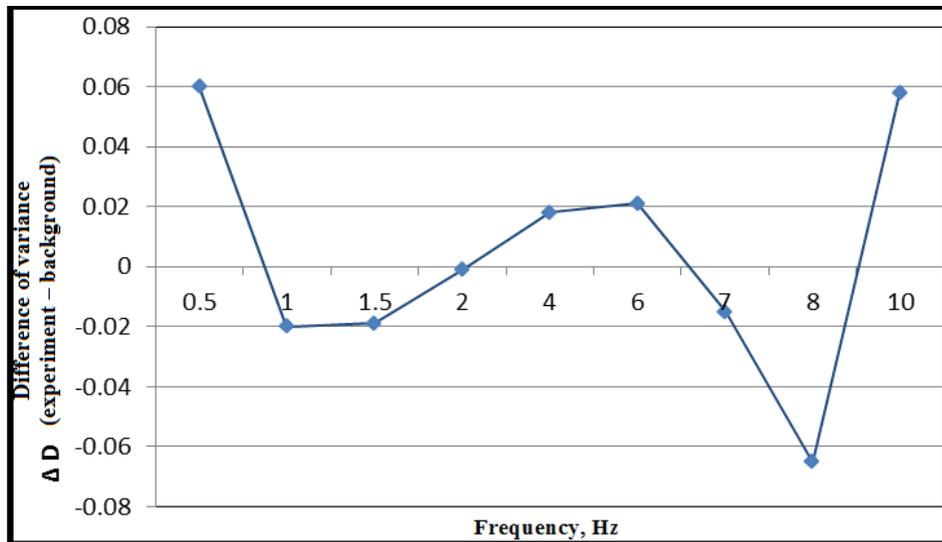


Figure 4.44 – Dependence of the variance difference (experience-background) on the exposure frequency (from the work [58]).

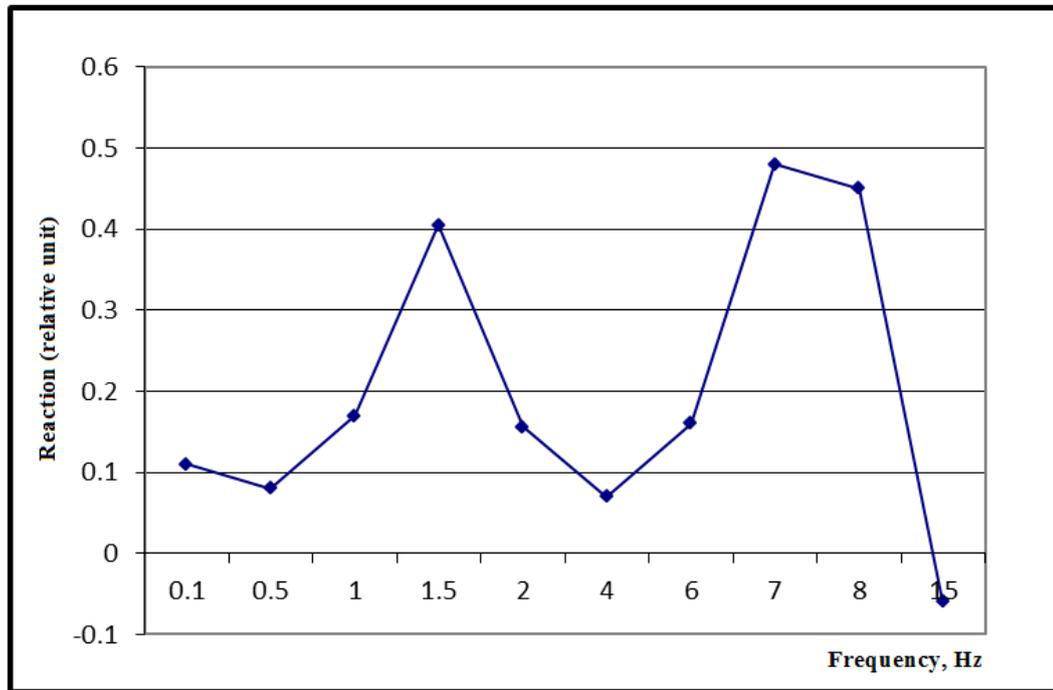
The obtained dependences show two areas that are associated with the increase in crab sensitivity on the operating frequency: one area of 1-1.5 Hz and another area of 7-8 Hz. The first area is obviously typical for heart rate and breathing rhythm at a constant water temperature in the experimental pool. The second area is not related to physiological functions of crabs, so it can be considered as a geophysical extremum.

#### Features of crab reactions without filtering the data.

As shown earlier (subsection 4.2.1), variance is not always the best characteristic of animal reaction to the external factors. Often, a more indicative characteristic is an average value of the reaction. It is necessary to use only consistent quasi-stationary parts of data series. It is especially important for crabs that are significantly less mobile than catfishes.

Therefore, the original data series obtained earlier by O. M. Vladimirova were processed here in this way. The obtained results are significantly different from the results

in picture 4.44. Frequency "windows" of the reaction are located in other ranges (Picture 4.45).



Picture 4.45 – Direct response of the crab (without filtering the data) to alternating magnetic field impact.

The first "window", as in the case with fishes, is physiological and characterizes the innervation reaction at heart rate (see for example picture 4.40). The second "window" is also geophysical.

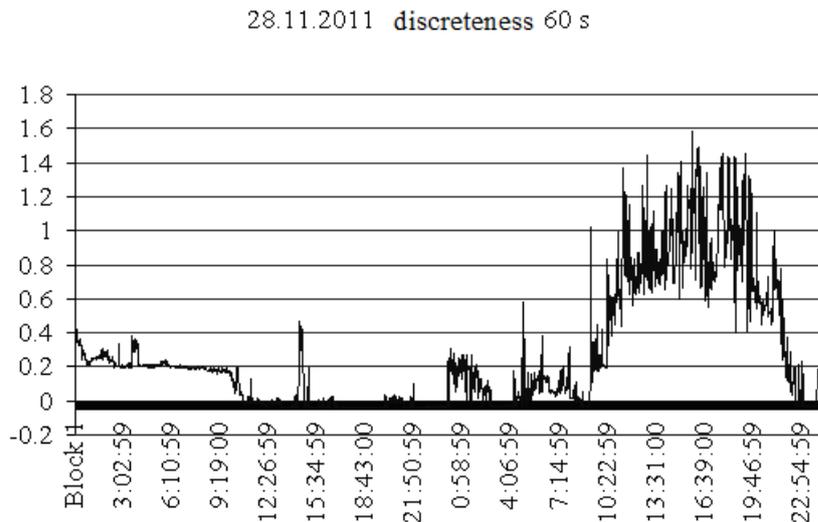
It should be noted that the direct reaction is mainly positive (the crab tries to "get away" from the field acting zone and pulls the thread connecting it with the recording device) selected "windows". That means they exist both in freshwater fish (carps, catfishes) and marine invertebrates (crabs).

### 4.3.2 Effect of passing cyclones on king crabs' motion behavior

In previous sections, the experiments with hydrobionts have already been mentioned, when the influence of passing cyclones on fish motion behavior was investigated. The work with crabs was a continuation of these experiments.

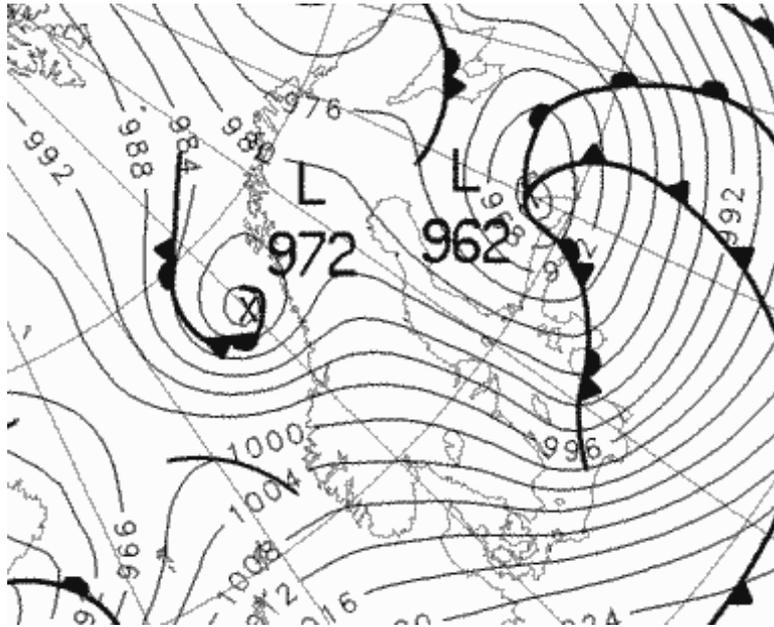
First of all, crabs are marine animals and, in the second place, invertebrates. Moreover, we wonder if crabs can respond to hydrometeorological processes and have presentiment of their oncoming.

A study of the king crabs reaction to the oncoming and passage of cyclones was undertaken on 28-29.11.2011 and 21-22.12.2011.

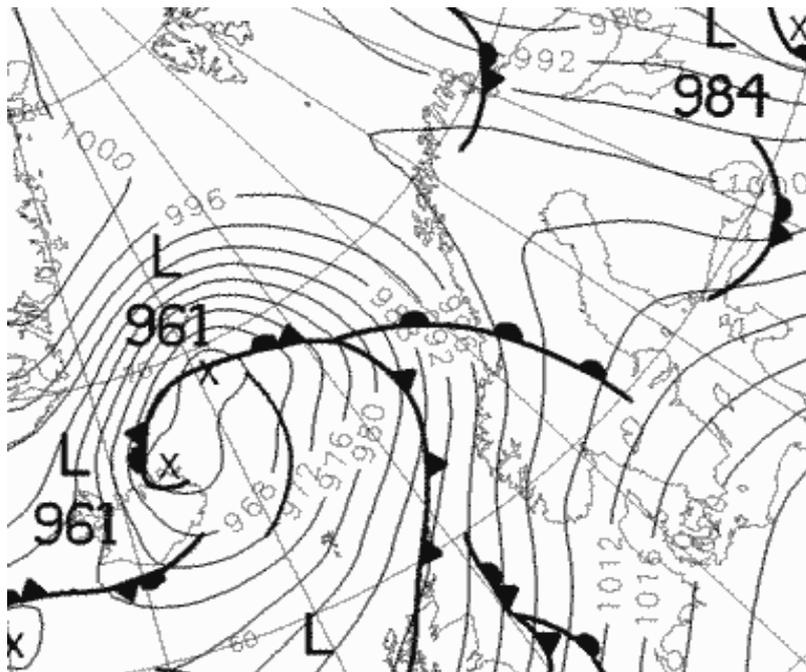


Picture 4.46 – King crabs' reaction to the oncoming of a powerful cyclone.

Picture 4.46 shows the crab reaction to the cyclone approach. This cyclone was mostly located over Norway, as shown on the synoptic maps, and it influenced Murmansk with its front part. Then on 29.11.2011 he turned south and left Murmansk (Pictures 4.47, 4.48). Accordingly, the crab "calmed down", and its motion behavior values decreased (the end of the record in picture 4.46).

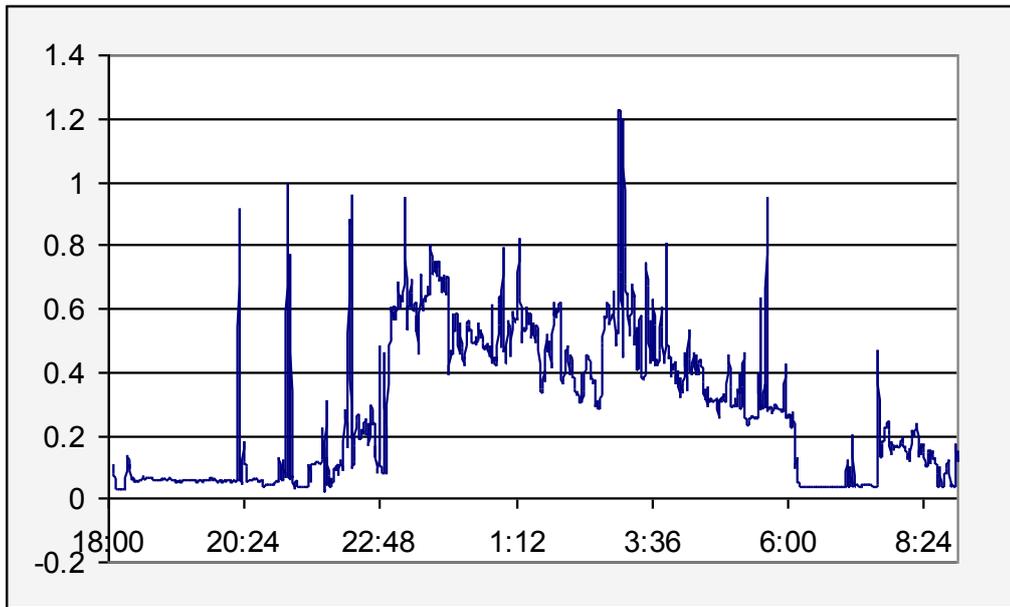


Picture 4.47 – A synoptic map with the cyclone over Norway under the date of 28.11.2011 04.00 Moscow time.

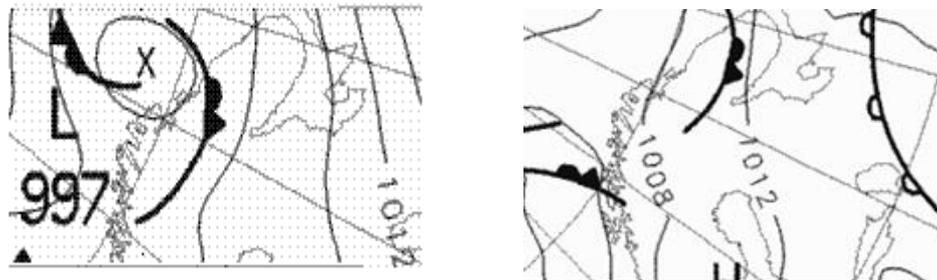


Picture 4.48 – The cyclone influencing Norway moves towards the South. 29.11.2011 04.00 Moscow time. Crabs calm down (see picture 4.46).

A similar situation was observed on 22 December 2011. A cyclone with occlusion front directly influenced the territory of Murmansk (Picture 4.50). The reaction of crabs was rather clear (Picture 4.49).

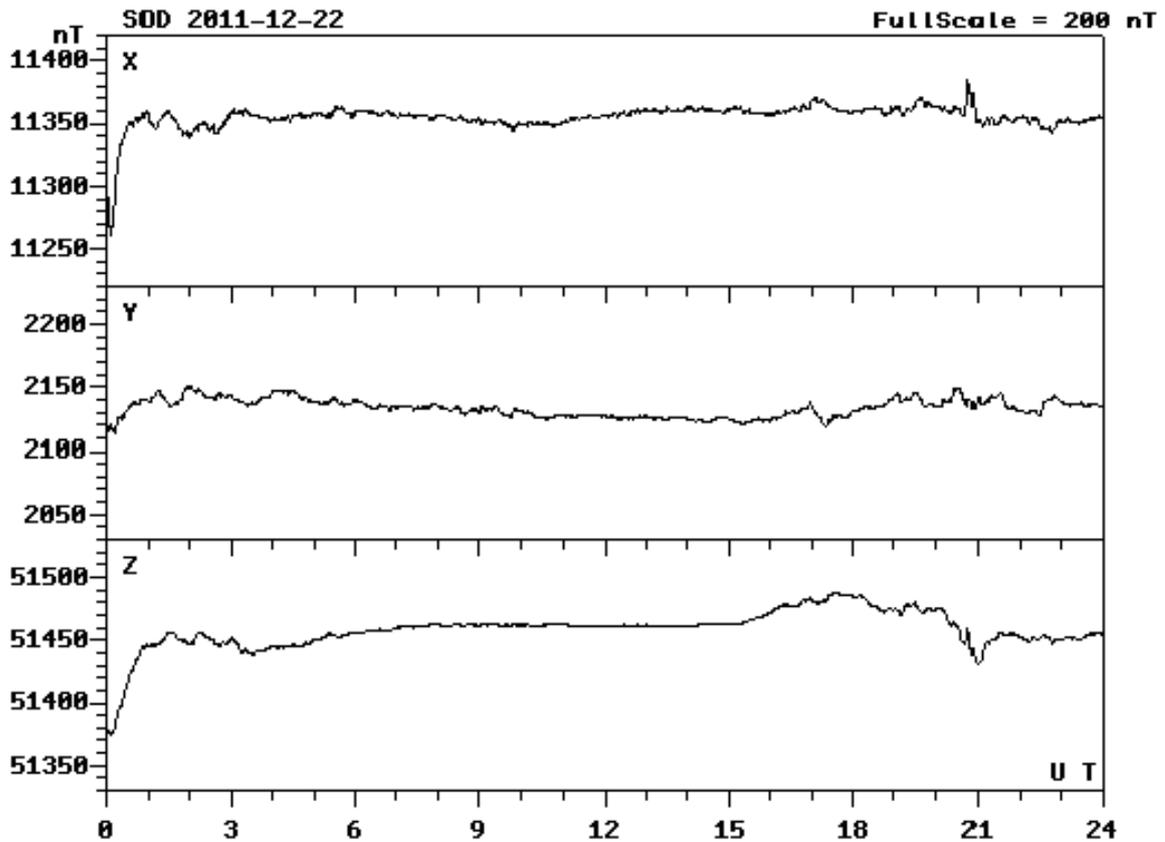


Picture 4.49 – The crab reaction recording from 18:05 21/12/11 to 9:00 22/12/12 (Moscow time).



Picture 4.50 – Fragments of the synoptic maps in the research area (21.12.11 – the left picture and 22.12.11 – the right picture) (04 hours of Moscow time).

It has been mentioned earlier about the crab reaction to geomagnetic disturbances (magnetic storms). In order to exclude such effects, the record of geomagnetic field variations from the observatory of Sodankylä (Finland), located as close as possible to Murmansk, was obtained simultaneously with the described experiments. Picture 4.51 shows the data for the period of motion behavior innervation of crabs. According to this picture it follows that innervation of crabs was not determined by geomagnetic disturbances. So the cyclone passage only influenced crabs, as the magnetic situation for this period was calm.



Picture 4.51 – Geomagnetic situation for the experiment on 22.12.2011 during the cyclone passage.

Thus, the results of the studies suggest that crabs react to the oncoming and passage of cyclones. In accordance with the obtained data on the frequency characteristics of magnetosensitivity, it may be concluded that crabs react to the alternating magnetic fields generated by these cyclones, and mainly at the frequencies of 7-8 Hz.

#### 4.4 Delay time of reaction («latent period») during the influence of the alternating electric and magnetic fields on the hydrobionts

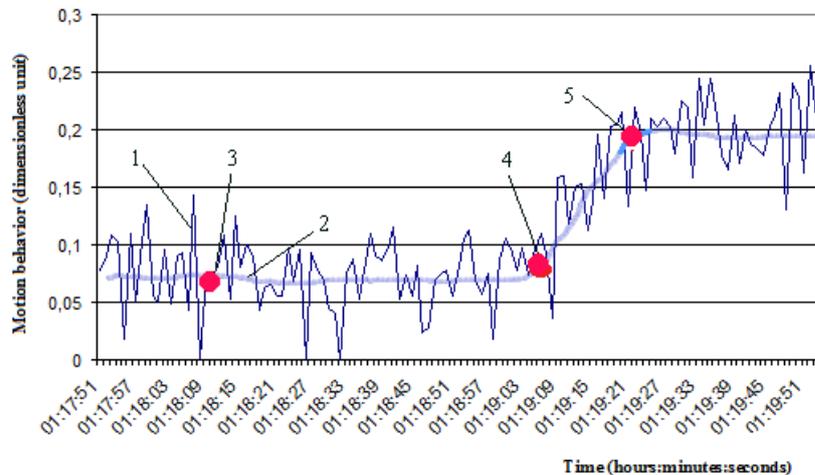
In subsection 3.2.1 theoretical bases of influence of alternating electric and magnetic fields on hydrobionts' motion behavior have been considered. The basis for this consideration was well-known experimental facts about the opposite reactions of hydrobionts to the so-called "anodic" and "cathodic" stimuli, that is, to the presentation of

electric fields of different polarity. Accordingly, the absence of reactions could be expected under the influence of alternating fields, but in fact it is not so.

In subsection 3.2.1 the mechanism of reaction formation due to nonlinear dynamic properties of the "action-reaction" connection is considered. And so for that, the effect of accumulation of elementary reactions, called "cumulative effect", appears.

In our experiments such cumulative delays of reactions have been revealed in some hydrobionts. Picture 4.52 shows the initial reaction of King crabs *Paralithodes camtschaticus*. Experimental methods are described in subsection 3.2 and in our work [76].

The inclusion of an influencing factor (alternating magnetic field with a frequency of 1 Hz) does not act immediately – the reaction is delayed by about 54 seconds and then, according to the law close to the logarithmic, it reaches its maximum value after about 16 seconds.

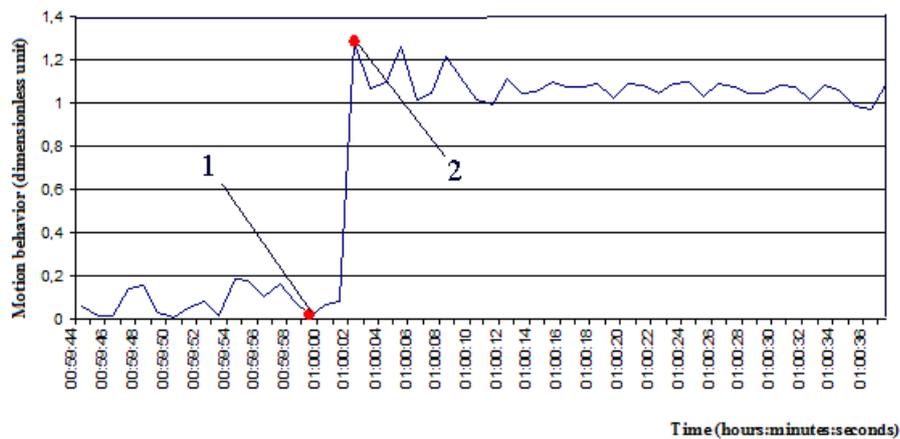


Picture 4.52 – The reaction of the crab *Paralithodes camtschaticus* to a magnetic field with a frequency of 1 Hz. Identification numbers: 1-motion behavior, discreteness=1 sec; 2-smoothed curve of motion behavior; 3 - the beginning of the field action (01:18:09); 4 – start of the reaction (01:19:06); 5 – maximum response (01:19: 22).

The lack of "smoothness" should be noted. The average oscillation period is about 3-4 seconds. Apparently, the main reason of these oscillations is suggested to be connected with some physiological characteristics that are unknown to us. Moreover, such

fluctuations remain unchanged after the beginning of the impact of alternating field, as well as after reaching the maximum response. Periods of 1 s are not detected in the results. The effect of the impact is the increase of motion behavior (alienation, attempt to leave the impact zone).

It can be expected that with increasing frequency the reaction delay should decrease, as a number of alternating "stimuli" increases. A typical example is shown in picture 4.53. Here, the total delay of the reaction (until the maximum reaction is achieved) occurs in only 3 seconds. And it is also important to note that the effect of the increase in motion behavior is significantly greater (compared to picture 4.52).

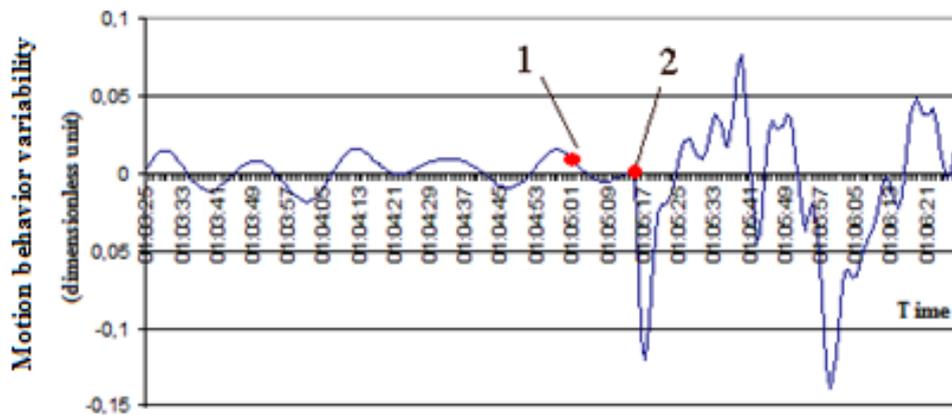


Picture 4.53 – Reaction of the crab *Paralithodes camtschaticus* to a magnetic field with a frequency of 8 Hz. Identification numbers: 1-the beginning of the field action, 2-the maximum reaction; discreteness=1 sec.

There are also motion behavior variations with the periods of 3-4 seconds, as it has been defined in the previous results. The amplitude values of the variations correspond approximately to the values in picture 4.52 (see motion behavior scale).

In previous experiments, we have found the reaction of motion behavior variance to be more interesting. The variance is known to appear in the fluctuations relative to the mean value. The current variance was calculated on 20 points with a step of 1 sec., the value was correlated to the 10th point.

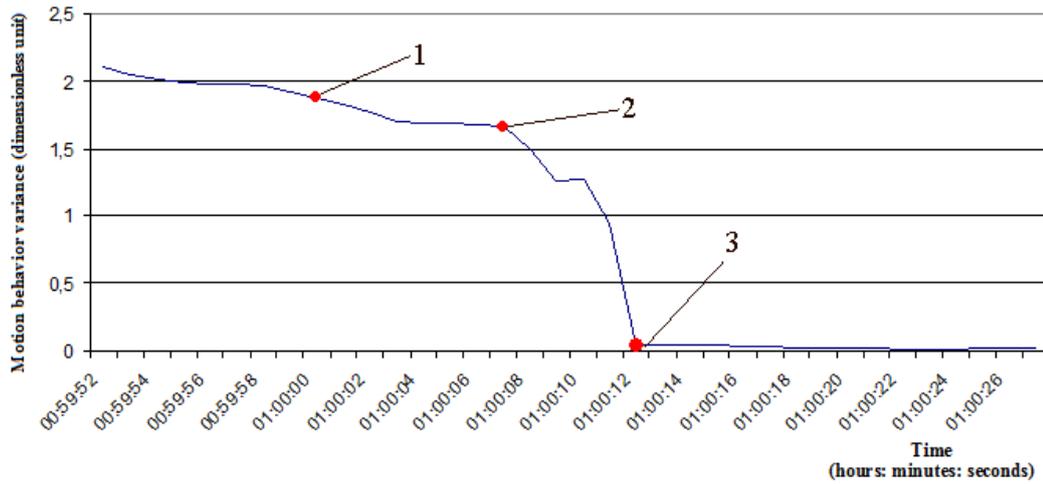
The variance was calculated after the series had been filtered with Potter's band-pass digital filter. A trend and high-frequency noises were eliminated during the data processing. Picture 4.54 shows a typical example of the variability of crabs' motion behavior relative to the zero mean value. The variance changes sharply after point number 2 (01:05:15) with a delay relative to the beginning of the action (point number 1) (01:05:01).



Picture 4.54 – A delay of motion behavior variability of the crab *Paralithodes camtschaticus* during the influence of alternating magnetic field with a frequency of 0.5 Hz. Identification numbers: 1 - the beginning of the impact; 2-the beginning of the reaction.

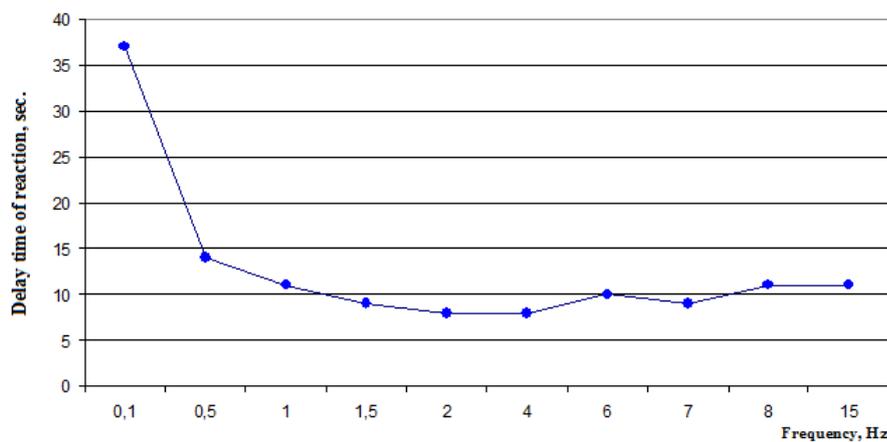
It is useful to note an interesting feature: the fluctuations of motion behavior were rather slow (18-20 sec.) before the magnetic field influence, the amplitude of the oscillations increased and the period decreased to 6-7 sec. after the field influence.

Picture 4.55 shows an example of the reaction delay in relation to the calculated variance of motion behavior. The variance reaction seems to be dragged out (Picture 4.55 in comparison with Picture 4.53), which is quite understandable, because it is associated with the specific features of the variance calculation (20 points shifted in one point step).



Picture 4.55 – A response delay of the motion behavior variance of the crab *Paralithodes camtschaticus* on 8 Hz alternating magnetic field. Identification numbers: 1-the beginning of the impact; 2-the beginning of the variance reaction; 3 - the maximum expected reaction.

The preliminary estimates of dependence between the reaction time and frequency are shown in picture 4.56. Here, the suggestion of the decrease in the reaction time with increasing frequency is confirmed. There is a small nonmonotonicity with increasing frequency, but this requires the additional study, particularly as the confidence intervals could not be defined because of a relatively small amount of data.

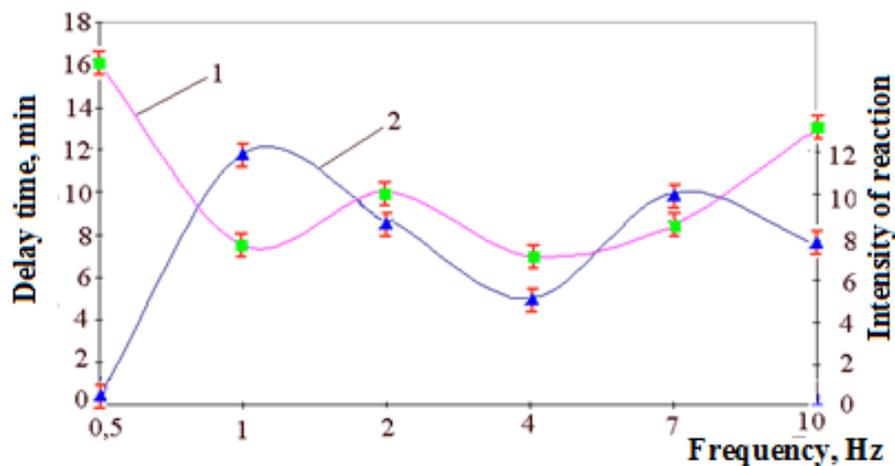


Picture 4.56 – The preliminary estimates of the variance reaction delay of motion behavior of the crab *Paralithodes camtschaticus* during the impact of alternating magnetic field of different frequencies.

*Catfishes.* The study of the reaction delays was also conducted with the catfishes. The reactions of small groups (8-11 fishes) of catfishes *Corydoras aeneus* to the influence of alternating electric and magnetic fields in the extremely low-frequency band were determined. The method of experiments is described in our work [76].

Fish are more mobile and can't respond too strongly to changes in external in particular, electromagnetic factors like bottom animals, for example crabs, for which storm waves on the sea surface, apparently, may be very dangerous because of their getting struck against the rocks. After all, storm waves with typical wavelengths of 100-150 meters can penetrate to depths of 50-70 meters.

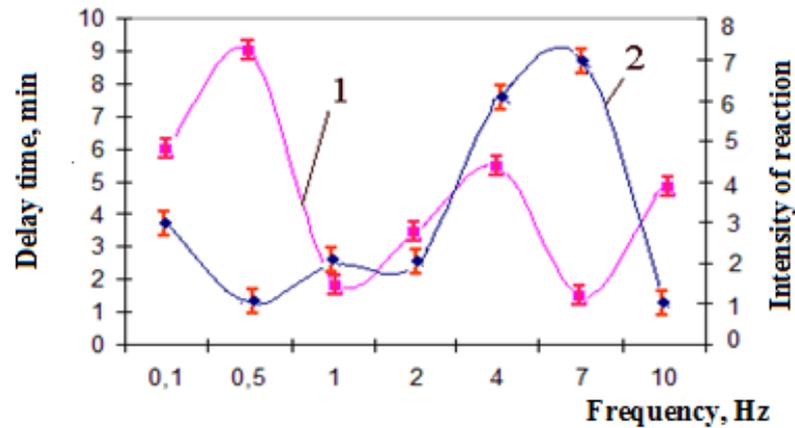
In the case with catfishes the reaction delays of the motion behavior variance also decrease with increasing frequency (Picture 4.57), but this is not a monotonic process. The experiments were carried out both in a magnetic field (Picture 4.57) and homogeneous electric field (Picture 4.58).



Picture 4.57 – The delay time of the reaction variance and the reaction intensity of catfishes *Corydoras aeneus* under the influence of alternating magnetic field of different frequencies. Identification numbers: 1-delay time; 2-reaction intensity.

The intensity of the reaction is put in these graphs in order to link the non-monotonic nature of the delays with the bimodal feature of the reaction intensity. The

bimodal character of reactions is considered by us in the following work [77] in relation to a problem of hydrobionts' reception of information on hydrometeorological processes over water. The graphs show that the reaction intensity (perception of an alternating field) and the reaction delay time are connected. The reasons for this connection are not clear yet.



Picture 4.58 – The delay time of the reaction variance and the reaction intensity of catfishes *Corydoras aeneus* under the influence of alternating electric field of different frequencies. Identification numbers: 1-delay time; 2-reaction intensity.

Our suggestions of the nonmonotonic character of the reaction delays add up to the fact that the nonlinear dynamic properties of hydrobionts considered here are characterized by the equations of higher orders than the equation (3.3) with its solutions (3.6). However, these assumptions require further research on the problem.

The generalized results obtained at different frequencies of alternating fields' influence on various types of hydrobionts are presented in table 4.4. The confidence intervals for the experiments with fish were defined at a confidence probability of 0.95.

Table 4.4 – The reaction delay time

Catfishes, electric field		Catfishes, magnetic field		Crabs, magnetic field	
Frequency, Hz	Delay time, minutes	Frequency, Hz	Delay time, minutes	Frequency, Hz	Delay time, seconds
<b>0,1</b>	<b>6 ±0,05</b>	<b>0,5</b>	<b>16.0±0,05</b>	<b>0,1</b>	<b>37,5</b>
<b>0,5</b>	<b>9.5 ±0,05</b>	<b>1</b>	<b>7.5±0,05</b>	<b>0,5</b>	<b>14</b>
<b>1</b>	<b>2 ±0,06</b>	<b>2</b>	<b>10±0,05</b>	<b>1</b>	<b>10,5-11</b>
<b>2</b>	<b>3.5 ±0,05</b>	<b>4</b>	<b>7.0±0,06</b>	<b>2</b>	<b>7,5-8</b>
<b>4</b>	<b>5.5 ±0,05</b>	<b>7</b>	<b>8.5±0,07</b>	<b>4</b>	<b>7,5-8</b>
<b>7</b>	<b>1.5 ±0,06</b>	<b>7 (cyclone)</b>	<b>12.0±0,07</b>	<b>7</b>	<b>9-9,5</b>
<b>10</b>	<b>5 ±0,06</b>	<b>10</b>	<b>13.0±0,06</b>	<b>8</b>	<b>10,5-11</b>

#### 4.5 Search for mechanisms of premonition by influencing the physico-chemical processes.

##### Experiments with a stormglass

The results, described in the previous sections, lead to the conclusion that the studied, and, apparently, many other, still unexplored, hydrobionts that don't have any sense of electric fields may be sensitive to weak alternating magnetic fields. The mechanism of magnetic sensitivity is currently unknown. The assumption that hydrobionts have some cells sensitive to the magnetic field, in particular, the so-called magnetosomes, is not tenable. Such elements in living organisms have not been clearly identified, moreover, there are no hypotheses about their possible interaction with the central nervous system of the body [15, 16].

Such uncertainty leads to the idea of perception of alternating magnetic fields by the whole organism, including cell membrane structures. According to our assumptions, the reaction of cell structures to alternating magnetic fields is due to the reaction of nonequilibrium processes in these structures.

Nonequilibrium biological processes are widely studied in biophysics (see, for example, M.V. Volkenstein's textbook [53]). In particular, this work [53] describes

different types of such processes. It is argued that some weak external factors can change biological processes shifting the balance of these processes in any direction.

The work also shows that such processes exist in physical and chemical systems, which can be used as models of biological systems.

In our tasks of search of the physical mechanism of presentiment of dangerous hydrometeorological processes by hydrobionts it was decided to use stormglass as a model of biological system and example of non-equilibrium physical and chemical systems. Stormglass was used by sailors as a predictor of the oncoming sea storms. The composition of stormglass is known and can vary depending on different constructions. Nevertheless, its basis is created by a number of specific substances that form a non-equilibrium system in their combination.

In general, modern stormglass is a sealed glass tube, containing a camphor–ethanol solution with aqueous  $\text{NH}_4\text{Cl}$  and  $\text{KNO}_3$  solution (Picture 4.59).



Picture 4.59 – The image of a typical stormglass.

There are various versions of specific recipes in the literature. It is evidenced that stormglass was used by sailors in the XVIII-XIX centuries. The observed process of crystallization under different weather conditions served as their indicator.

In the conducted experiments the standard ampoule of stormglass was used in the form of a container filled with a mixture of camphor, ammonia and potassium nitrate (4:1:1) dissolved in a mixture of alcohol and distilled water. Visual observations of the stormglass reaction were mainly considered in previously published reports of various authors, for example [78, 79]. The synoptic situation was also visually assessed. The technical advantage of the facility discussed below is the possibility of impersonal automatic continuous recording of these characteristics.

#### 4.5.1 Experimental facility

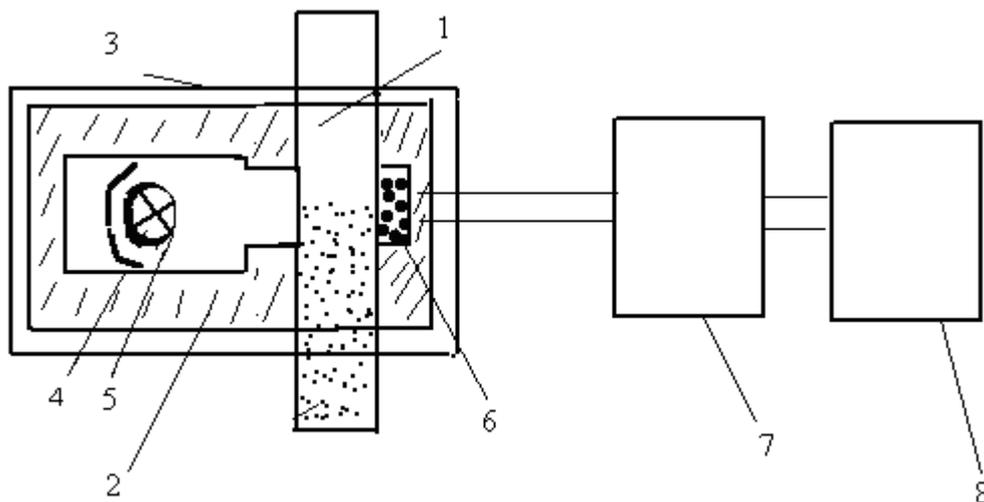
The facility for recording variations of the characteristics of the physico-chemical system of stormglass contains a flask 1 with a physico-chemical system. Stormglass flask is placed in the case of heat-insulating chamber 2 with a light-isolator 3. The case is provided with the narrow windows (light-transmission windows), and the observation system contains a light source 5 focused by a reflector 4 and placed near one of the windows (output light-transmission window), and a photoelectric receiver 6 placed at the opposite window of the case. The stormglass flask is oriented vertically with the intersection of the light beam approximately in the middle of its structure. The photoelectric receiver 6 is connected to the analog-digital input of the personal computer 8 through the electronic circuit of the amplifier 7 [80].

The facility for observation and registration functions in the following way: the stormglass flask 1 is placed in thermo-2 and light-insulated box 3, and only one window remains open. Focused by the reflector 4, the light beam from the source 5 is passed through this window. After passing through the flask, this beam is perceived by the photoelectric receiver 6, then the signal is received by an analog-to-digital converter to the personal computer 8 through the electronic circuit (amplifier) 7 (Picture 4.60) [80].

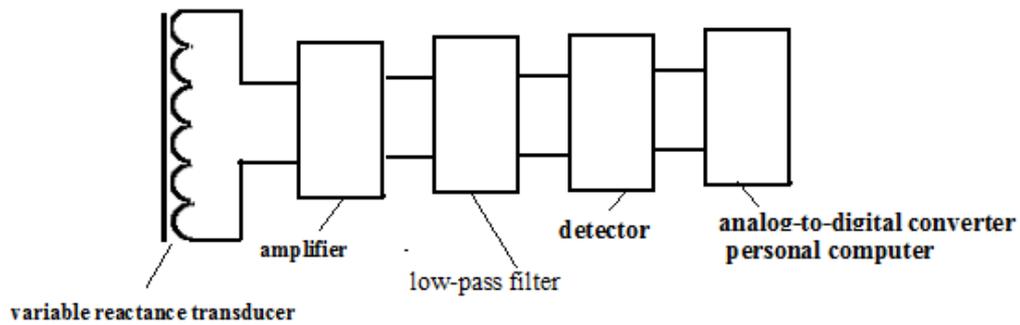
This design allows to get rid of subjective errors of observations, air temperature variations in the location of the facility. This construction also helps to eliminate the influence of external light sources on the optical system of the device. The connection to the personal computer's analog-to-digital converter provides the required continuous recording of optical density in the field of variability of the physico-chemical structure of stormglass.

All this provides the required technical result – the possibility of an objective automatic continuous recording of the characteristics of variability of the stormglass structure.

In parallel, the second channel of the analog-to-digital converter received a signal from the natural alternating magnetic field measurer with a pass band in the area of 7-8 Hz (Picture 4.61). An induction coil (40 000 turns) with a ferromagnetic core was used as a sensor here. The signal from the coil came to a preamplifier and passed through a low-pass filter, then it was detected by the circuit of two operational amplifiers. After that, the second channel of the personal computer's analog-to-digital converter received the signal. Synoptic maps (surface weather analysis), as in case with the experiments with fishes, were taken from the public German web-site.



Picture 4.60 – The experimental facility for recording the variability of characteristics of the physico-chemical system of stormglass (first channel).

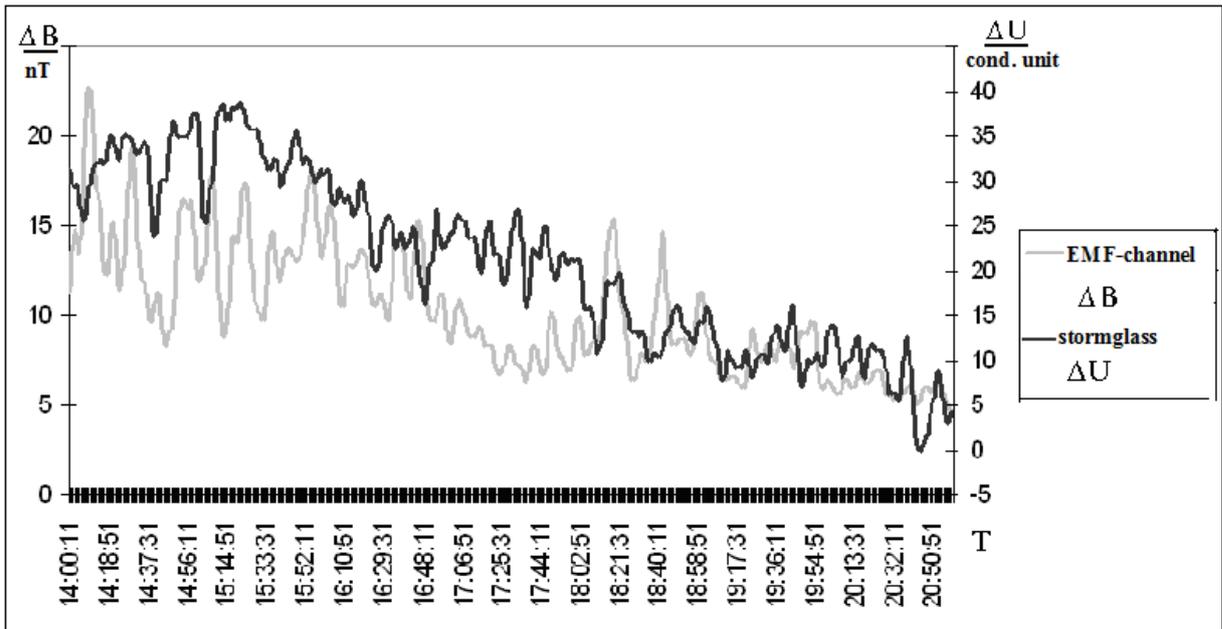


Picture 4.61 – Scheme of the experimental facility for the measurements of the natural alternating magnetic fields (second channel).

The experiments were carried out under the assumption that electromagnetic fields in the mentioned frequency area have an impact on the stormglass structure. Earlier [1] it was found that cyclones and atmospheric fronts generate such fields, which can spread in the direction of cyclone movement up to 1000-1500 km. The induction near a cyclone could reach 10-15 nT.

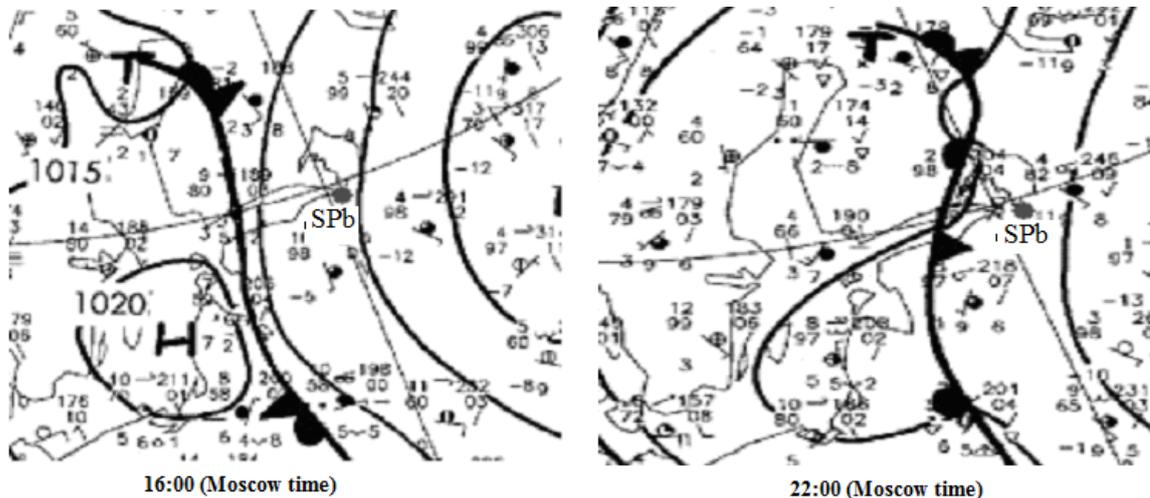
#### 4.5.2 Results of the observations

During the experiments with stormglass it has been found out that some synchronous "events" in the records of the stormglass optical density and perturbations of the induction exist in the frequency area of 7-8 Hz [81]. These "events" correspond to the passage of a cyclone with front sections (Pictures 4.62 - 4.65). The "events" were determined by the statistical analysis of the series obtained from the records of two channels in the software package "Mesosaur".

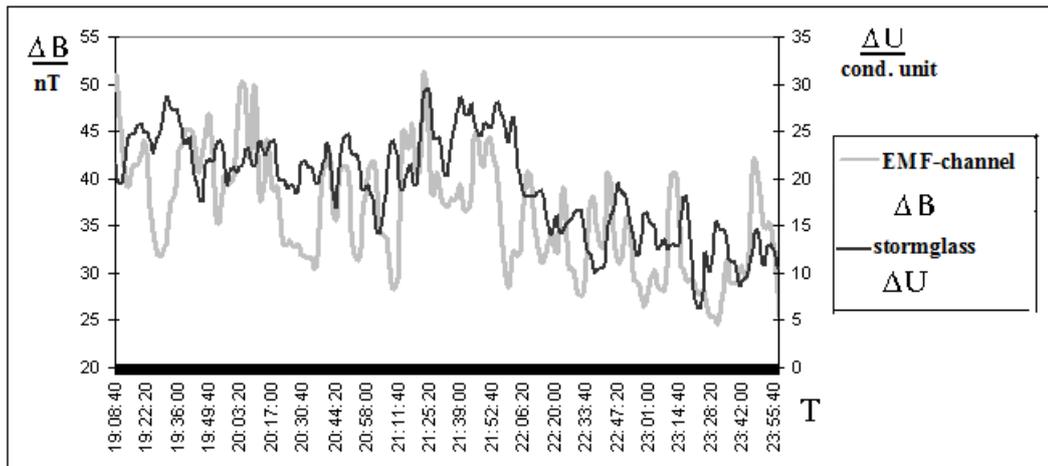


Picture 4.62 – The dependence of data received on two channels (EMF-channel and stormglass) from 14:00:11 to 21:00:51 (10.04.09).  $\Delta B$  is the induction variation,  $\Delta U$  is the variation of the stormglass signal. Significant correlation coefficient = 0.73.

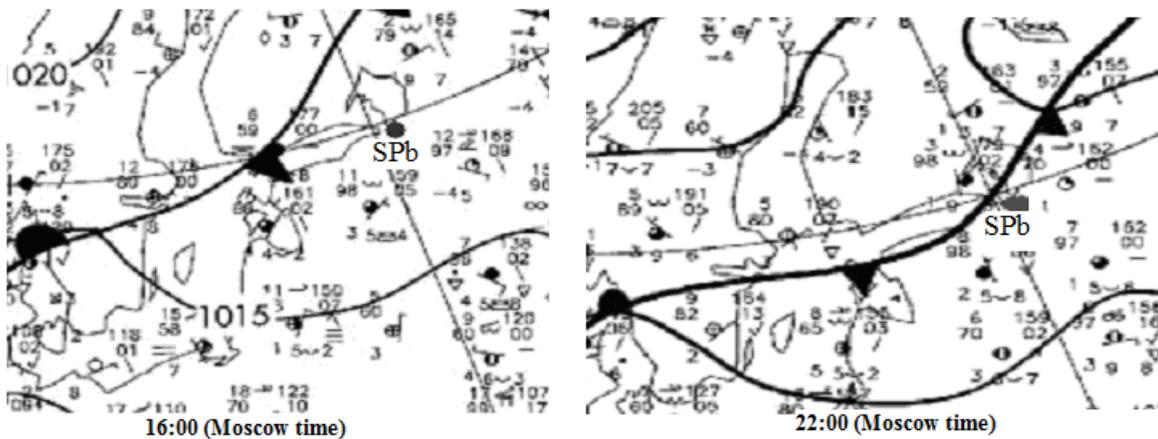
The delay time of the stormglass reaction = 2-3 min.



Picture 4.63 – The synoptic maps of the studied area (10.04.09 16 hours and 22 hours. Moscow time). The observation point –St. Petersburg.



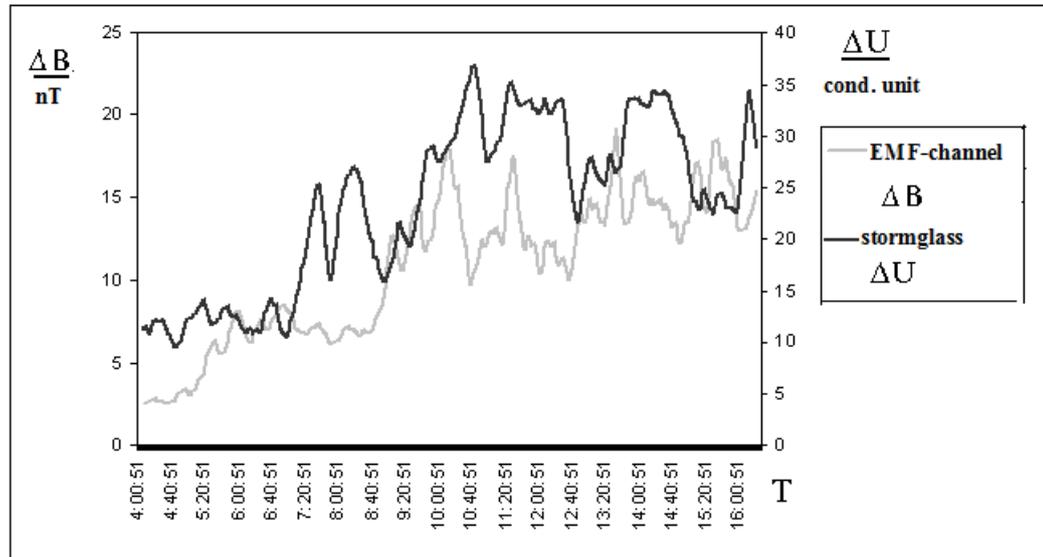
Picture 4.64 – The dependence of data received on two channels (EMF-channel and stormglass) from 19:08:40 to 23:58:00 (14.04.09).  $\Delta B$  is the induction variation,  $\Delta U$  is the variation of the stormglass signal. Significant correlation coefficient = 0.51. The delay time of the stormglass reaction = 8 min.



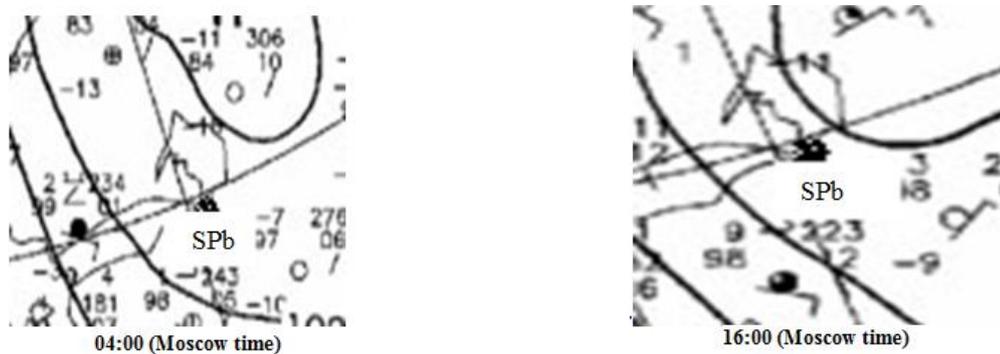
Picture 4.65 – The synoptic maps of the studied area (14.04.09 16 hours and 22 hours. Moscow time). The observation point –St. Petersburg.

To assess the possible "premonition" or delay in the reaction to the variable electromagnetic field, series smoothing was first performed using a moving average, and then a cross-correlation analysis of the smoothed series was performed. Figure 4.66 shows the results of such analysis, and the SYNOPTIC maps for the time of this experiment are shown in figure 4.67. The highest correlation coefficient between the two rows was 0.83 with a shift of 110 steps, which corresponds to 37 minutes with a step equal to 20 seconds.

According to the experiment 09.04.09, the reaction of stormglass to electromagnetic phenomena began 37 minutes later.



Picture 4.66 – An example of the statistical analysis of two series (04:00:51 – 16:28:51 09.04.09). The black line is the smoothed stormglass reaction, the gray line is the smoothed reaction of the electromagnetic channel.  $\Delta B$  is the induction variation,  $\Delta U$  is the variation of the stormglass signal. The intensification of the stormglass reaction in the left area from the "event" is not identified. The delay time of the stormglass reaction = 37 mins (110 steps).



Picture 4.67 – The synoptic maps of the studied area (4 hours and 16 hours 09.04.09. Moscow time). The situation of the anticyclone. The observation point –St. Petersburg.

Interesting results are obtained in the opposite case when an anticyclone is recorded in the point of observation. Before the oncoming of the anticyclone a complex meteorological situation with front sections was observed. In this regard, the optical density of the stormglass is low, and then it increases (Picture 4.66) in contrast to the results described earlier. The signal of EMF-channel rises (the curve of the stormglass values is inverted, as before, for visual expression). All this makes us think that stormglass signals are clearly connected with electromagnetic signals.

However, not any cyclone and not any front sections, both associated with the cyclone and existing separately, for example, in pressure troughs, form such "events". Apparently, this shows that stormglass, as a "predictor" of storms, was used by sailors because of the lack of more reliable methods. Of course, it can't replace modern forecasting methods based on synoptic maps, but in the absence of such methods it can provide substantial assistance.

It was also observed that the stormglass signals increased when there was an anticyclone in the studied area. This is equivalent to a decrease in the optical density that means an increase in transparency (the signal from the photoelectric receiver  $\Delta U$  changes back to the optical density).

## Conclusion

The presented results are devoted to the study of possible presentiment of dangerous hydrometeorological phenomena by some biological (in particular fishes and crabs) and physico-chemical systems (on the example of stormglass). The described subject is very relevant today, it is directly related to one of the most important tasks of hydrometeorology – the prediction of dangerous processes in nature. Unfortunately, today our knowledge about possible mechanisms of animals' presentiment is quite small. It is most likely that there is much more evidence of animals' possibilities in terms of presentiment of various disasters than physical explanations of the mechanisms of this presentiment. At present, there is a lot of uncertainty in function and work of living organisms' special organs the existence of which has already been proven, but the assumption that the reaction occurs at the level of cell structures is unambiguous.

The thesis considers various examples that prove the presence of a common mechanism of premonition in non-equilibrium biological and physico-chemical systems. The special attention is paid to fish as the inhabitants of the aquatic environment, the study of which indirectly touches upon the conducted research. It is possible that a very special signal system used by fish and other aquatic animals exists in the aquatic environment, not familiar to the inhabitants of the land.

In this work it is noted that the Earth's geomagnetic field has a significant impact on both fish and other animals. The knowledge of possible mechanisms and methods of presentiment, as well as function of living beings' special organs is of great theoretical and practical importance and can contribute to the development of methods for predicting dangerous phenomena.

The aim of the thesis was to study the effects of perception and presentiment of dangerous hydrometeorological processes by a number of freshwater and marine hydrobionts and define possible physical mechanisms of these effects. In the course of the experimental studies, the following main results were obtained.

- Two special facilities for the experiments have been developed and used. Novelty of the technical solutions is confirmed by the patents of the Russian Federation.

- The daily biological rhythm of the fish in quiet geophysical and hydrometeorological conditions has been determined on the results of the 34-hour experiment; these data were used for the detection of fish responses to hydrometeorological processes.
- The dependence of fish average motion behavior on the intensity of geomagnetic disturbances. The maximum value of the correlation coefficient is «-0.8» for carps and «+ 0.87» for catfishes; various correlation coefficient's signs represent the opposite reaction of these fish to magnetic disturbances.
- Using the methods of the fractal theory, it has been found that fish behavior is mainly deterministic; the decline in "chaos" is usually associated with fronts and cyclones during the experiments.
- The intensity and time of fish reaction to the presentation of extremely low-frequency band artificial alternating electric and magnetic fields have experimentally been revealed; the revealed extreme values of frequency dependences have been interpreted as physiological (breathing rhythm and heart rate) and geophysical(7-8 Hz area) areas.
- The King crabs' responses to magnetic storms were experimentally determined. The effect of premonition of the magnetic storm beginning has been revealed.
- The reactions of King crabs to cyclones were experimentally defined. The reactions are characterized by motion behavior intensification, that is, apparently, connected with the crabs' desire to escape from the action zone.
- First the direct instrument measurements of the variability of the physico-chemical structure (stormglass) with the parallel measurements of the electromagnetic field in the area of 6-8 Hz were conducted. During the experiments with the stormglass physico-chemical structure the hypothesis about the reaction of such structures to electromagnetic fields of some hydrometeorological processes (for example, cyclones) has been confirmed, that, in turn, leads to the confirmation of the idea of hydrobionts' sensitivity to magnetic fields through similar structures.

### List of references

1. Stepanyuk I. A. Electromagnetic fields of aero-and hydrophysical processes. St. Petersburg, 2002. 214 p.
2. Zimin A.V. Electromagnetic fields of hydrometeorological processes and estimation of their impact on certain types of hydrobionts. Candidate of physical and mathematical sciences: 11.00.11. - St. Petersburg, 2000. 130 p.
3. Doronin Yu. P., Stepanyuk I. A. Electromagnetic field of the ocean. St. Petersburg, RSHI, 1992. 87 p.
4. Doronin, Yu. P. Physics of the ocean. St. Petersburg, RSHU, 2000. 340p .
5. Balandina N. L. The role and characteristics of accounting of cosmogeophysical environmental factors in fishery technologies. Candidate of techn. sciences'.- St. Petersburg, 2005.Specialty 25.00.36-Geoecology, 139 p.
6. Lazdin A.V., Protasov V. R. Electricity in the fish life. Moscow, Nauka, 1977. 88 p.
7. Olshansky V. M. Bionic modeling of electric systems of weakly electric fish. Moscow, Nauka, 1990. 208 p.
8. Presman A. S. Electromagnetic signal system in nature (facts, hypotheses, research ways). Moscow, Sovetskoe radio, 1974. 64 p.
9. Protasov V. R., Bondarchuk, A. I., Olshansky V. M. Introduction to electroecology. Moscow, Nauka, 1982. 336 p.
10. Bennett M. V. L., Clusin W. T. Physiology of the ampulla of Lorenzini. The electroreceptor of elasmobranches. *Sensor Biology of Sharks, Skates and Rays*. Washington DC, Government Printing Office. 1978. pp. 483 -505.
11. Kalmijn, A. J. (1982). Electric and magnetic field detection in elasmobranch fish. *Science* 218: 916-918.
12. Stepanyuk I. A. Features of reactions of biological and physico-chemical systems to external factors. St. Petersburg, RSHU, 2004. 98 p.
13. Fonarev G. A. About the main directions of marine electromagnetic research. In the book.: *Electromagnetic research in the ocean*. Vladivostok, 1983. pp. 3-21.

14. Muraveiko, V. M., Stepanyuk I. A. To the question of the possible mechanism of presentiment of biologically important geophysical phenomena by sea animals. *Morphological and physiological aspects of the fish and invertebrates of the Barents sea*. Apatity, 1982. Pp. 85-92.
15. Stepanyuk I. A., Muraveiko V.M. Natural alternating electromagnetic field of the resonator Earth-ionosphere as a factor of marine animals' bioregulation. *Physiology of marine animals*. Apatity, 1989. Pp. 89-90.
16. Stepanyuk I. A., Moraveiko V. M. EM-field of the resonator Earth-ionosphere as a synchronizer of the internal rhythm of aquatic organisms. *Scientific notes of the Vernadsky Taurida National University. Series "Biology. Chemistry"*. 2002, vol. 15 (54), no 1, pp. 73-76.
17. Sochelnikov V. V. Basics of the theory of natural electromagnetic field in the sea. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979. 216 p.
18. Bondarenko N. F., GAK E. Z. Electromagnetic phenomena in natural waters. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984. 152 p.
19. Muraveiko V. M. Electrosensory systems of animals. Apatity, 1988. 110 p.
20. Bichkov V. S., Zhmur V. V., Lapshin V. B. About electromagnetic effects in oscillations of the charged sea surface. *Geomagn. and aeron.* 1979, XIX, no. 4, pp. 762-764.
21. Broun G. R., Ilyinsky O. B, Moraveiko V. M., Gorshkov E. S. The pattern of the reception of the aquatic vertebrates of the Earth's magnetic field. *Discovery*, no 371, 1992.
22. Pozdnyakova V. A. Practical aviation meteorology. Ekaterinburg, 2010. 113 p.
23. Temurianz N. A., Vladimirsky B. M., Tishkin O. G. Extremely low-frequency band electromagnetic signals in the biological world. Kiev, 1992. 188 p.
24. Rikitake T. The earthquake prediction. Moscow, Mir, 1974. 574 p.
25. Sidlauskaite L. A. Reactions of water animals in electromagnetic fields. *Proceedings of Academy of Sciences of the Lithuanian SSR*. 1973, Ser. B, vol 2, p. 127.
26. Phillips J. B., Adler K. Directional and discriminatory responses of salamanders to weak magnetic fields. *Animal Migration Navigation and homing*. Berlin, 1978. Pp. 325-333.

27. Keeton W. T. The oriental and the navigational basis of homing in birds. *Adv. Study Behav.* 1974, No. 5, pp. 47-132.
28. Simakov Yu. G. Live devices. Moscow, Knowledge, 1976. 103 p.
29. Kirschvink J. L. Birds, bees and magnetism: a new look at the old problem of magnetoreception. *Trends Neurosci*, 1982, vol.5, pp. 160-167.
30. Stepanyuk I. A. Infrasound: physics and biology. *Physics*. 2007, no 1, pp. 39-44.
31. Brown G. R., Ilyinsky, O. B., Moraveiko V. M. and others. Perception of telluric currents, resulting from geomagnetic variations, by electroreceptors of the shark ampullae of Lorenzini. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1978, vol. 241, no 5, pp 1228-1231.
32. Brown G. R., Ilyinsky, O. B., Moraveiko V. M. and others. Perception of electric fields of waves by electroreceptors of the ampullae of Lorenzini. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1979, vol. 248, no 1, pp. 252-254.
33. Lissmann, H. W. and Machine, K. E., Electric Receptors in a Non-Electric Fish. *Nature*. 1963, vol. 199, pp. 88-89.
34. Peters R. S., Buwalda R. J. A. Frequency response of the electroreceptors (“small pit organizations”) of the catfish, *Ictalurus nebulosus* Les. *J. comp. Physiol.* 1972, no 79, pp. 29-38.
35. Stepanyuk I. A. and others. Influence of geomagnetic field variations on fish motion behavior. *Final session of the RSHI Academic Council : Abstracts of the reports*, St. Petersburg, 26-27 January 1995. Pp. 45-46.
36. Stepanyuk I. A., Zimin A.V., Lebedeva I. K. The Earth’s resonance electromagnetic field disturbances and their influence on biological objects *Final session of the RSHI Academic Council : Abstracts of the reports*, St. Petersburg, 26-27 January, 1999. Pp. 81-82.
37. Vladimirsky B. M., Temurianz N. A., Martynyuk V. S., Space weather and our life. Fryazino, 2004. 224 p.
38. Kleimenova N. G., Troitskaya V. A. Geomagnetic pulsations are as one of the ecological factors. *Biophysics*, 1992, vol. 37, no 3, pp. 429-437.

39. Dubov A. P. Geophysical factor is as a synchronizer of biorhythms. *Proc. 4th International Symposium in Pushchino*, Moscow region, 1996. P. 68.
40. Vladimirsky B. M., Temurianz N. A. The influence of solar activity on the biosphere-noosphere. Moscow, 2000. 374 p.
41. Nusenbaum, L. M., Faleeva T. I. Study of fish behavior in an electric field. 1961, vol. 52, iss.1., p. 93.
42. Danyulite G. P. Some special features of the sprat behavior in a homogeneous field of constant and pulse currents. *Proceedings of Academy of Sciences of the Lithuanian SSR*. 1963, Ser. B, iss. 3/32, pp. 181-194.
43. Nusenbaum L. M. About fish behavior in an electric field in connection with the problem of their protection in hydraulic engineering. 1958. Pp. 132-142.
44. Lamarque P. Electrophysiologie du poisson soumis a l'action d'un champ electrique. *Applications de l'electricite a la biologie et a l'aménagement des peches continentales*. 1968. Pp. 87-116.
45. Malkyavichus S. K., Danyalite G. P., Samarkin A. A. About behavior of some marine fish in electric fields. *All-union conf. on the question of studying fish behavior in connection with the technique and tactics of fishing*. Murmansk, PINRO, 1968. Pp. 27-35.
46. Eydi U. R. Frequency and power windows at the time of weak electromagnetic fields' influence on living tissue. *Proceedings the Institute of Electronics and Radio engineers*. 1980, iss. 68, no. 1, pp. 140-148.
47. Stepanyuk I. A., Gavrilova O. Yu., Kochetkova E. S. The problem of biological presentiment of extreme cosmogeophysical events. *Cosmogeophysical factors of ecology of biological systems*. St. Petersburg, Asterion, 2007. Pp. 23 – 31.
48. Govorkov V. A. Electric and magnetic fields. Moscow, 1968. 488 p.
49. Stepanyuk I. A. The problem of monitoring of extremely low-frequency band electromagnetic fields in the troposphere and hydrosphere of the Earth. St. Petersburg, RSHU, 2014. 204 p.
50. Chizhevsky A. L. The earth echo of solar storms. Moscow, 1973. 349 p.
51. Chizhevsky A. L. Cosmic pulse of life. Moscow, 1995. 767 p.

52. Frolova N.S. The facility for registration of hydrobionts' motion behavior: Patent RF, no. 148670, 2014.
53. Volkenstein M.V. Biophysics. Moscow, Nauka, 1981. 575 p.
54. Feder E. Fractals. Moscow, Mir, 199. 670 p.
55. Marchuk V. I., Tokareva S. V. Methods of detection of anomalous values in the analysis of non-stationary random processes. Shakhty, 2009. 209 p.
56. Polyakov K. V. Increase of reliability for one of the procedures of detection. Radiotechnics, 1990, no. 6, pp. 57-59.
57. Golubkov A. S. The sorting of unreliable results of telemetry. *Metrology*. 1973, no 2, pp. 10-18
58. Vladimirova O. M. Perception of alternating artificial and natural magnetic fields by King crabs. Master. thesis. Specialty 28.04.00-Applied Hydrometeorology, St. Petersburg, 2013. 66 p.
59. State Standart 8.736–2011. The state system of ensuring the unity of measurements. The repeated direct measurements. Methods of processing of measurement results. Main features. Moscow, Standartinform, 2013. 24 p.
60. State Standart 11843-4-2005. Statistical methods. Detection capability. A method of comparing the minimum detectable value with an assigned value . Moscow, Standartinform, 2006. 13 p.
61. State Standart 11843-1-2007. Statistical methods. Detection capability. Part 1. Terms and definitions. Moscow, Standartinform, 2007. 12 p.
62. Shishkin I. F. Metrology, standardization and quality control basics. Moscow, 1988. 320 p.
63. Selivanov M. N., Friedman, A. E., Kudryashova J. F. The quality of measurements. Leningrad, Lenizdat, 1987. 295 p.
64. Astafieva N. M. Wavelet analysis: basic theory and application. *Successes of physical sciences*. 1996, vol. 166, no11, pp. 1145-1170.
65. Stepanyuk I. A., Balandina N. L. Komarova O. V. The influence of pH of water on carps' behavior. *Cosmogeophysical factors of ecology of biosystems*. St. Petersburg, Asterion, 2007. Pp. 51-57.

66. Stepanyuk I. A., Petrova M. N., Frolova N. S. The influence of cosmogeophysical factors on carps' behavior. *Cosmogeophysical factors of ecology of biosystems*. St. Petersburg, Asterion, 2007. Pp. 42-50.
67. Zimin A.V., Balandina N. L. Grekova A. N. The influence of space-geophysical factors on fishery of aquatic organisms. *Cosmogeophysical factors of ecology of biosystems*. St. Petersburg, Asterion, 2007. Pp. 71-83.
68. Stepanyuk I. A., Frolova N. S. Possibilities of using fish for prognostic purposes to predict dangerous processes in nature. *Society. Environment. Development.: Scientific Journal «TERRA HUMANA»*. 2011, no. 3, pp 218-222.
69. Stepanyuk I. A., Psalomshchikov V. F. Extremely low-frequency band electromagnetic variations observed during a cyclone passage over the sea. *Modeling and full-scale hydrological studies of the seas: Collection of scientific works*. St. Petersburg, 1994. Pp. 181-186.
70. Stepanyuk I. A., Muraveiko V. M. The question of the possible mechanism of sea animals' presentiment of biologically important geophysical phenomena. *Morphological and physiological aspects of the fish and invertebrates of the Barents Sea*. Apatity, 1982. Pp. 85-92.
71. Stepanyuk I. A. Perception of natural electromagnetic fields as a basis of the mechanism of presentiment of dangerous hydrometeorological processes' oncoming. *Atmosphere and human health: Proceedings of the All-Russian conference, St. Petersburg, 24-26 November 1998*. St. Petersburg, Hydrometeoizdat, 1998. Pp. 71-72.
72. Biogenic magnetite and magnetoreception. Under the ed. Kirschvink, D. Jones, B. Mak-Fidena. Moscow, Mir, 1989. 353 p.
73. Biology and physiology of King crabs in the coastal zone of the Barents Sea. Apatity, 2008. 168 p.
74. Stepanyuk I. A., Muraveiko V. M., Emelina, A.V., Bekhteva V. V. Specific features of King crabs' motion behavior. *Cosmogeophysical and hydrophysical factors in marine technology*. St.Petersburg, Asterion, 2008. Pp. 12-21.
75. Zenchenko T. A., Rekhtina , A. G., Zaslavskaya R. M. , Firsova E. V. Method of investigation of possible relationship parameters of microcirculation with the geomagnetic

- situation characteristics. *Cosmogeophysical factors of biological systems' ecology*. St. Petersburg: Asterion, 2007. Pp. 32-41.
76. Frolova N. S., Stepanyuk I. A. Electromagnetic fields of hydrometeorological processes as a factor of hydrobionts' ecology *Electronic scientific journal "SCI-ARTICLE.RU"*, 2016, no 35, Pp. 84-95.
77. Frolova N. S., Stepanyuk I. A. Physical mechanisms of hydrobionts ' perception of biologically important hydrometeorological processes over water bodies. *Electronic scientific journal "SCI-ARTICLE.RU"*, 2017, no 43, Pp. 232-244.
78. Baranovsky E. A., Tarashchuk V. P., Vladimirsky B. M. The influence of solar activity and geophysical disturbances on physico-chemical processes in a liquid medium. *Geophysical processes and biosphere*, 2010, vol. 9. no1. Pp. 19-33.
79. Baranovsky E. A., Tarasuk V. P., Vladimirsky, B. M. The Fitzroy flask (stormglass) as an indicator of the earth and space weather. New data. *Space and biosphere: Abstracts of the IX international Crimean conference*, Simferopol, 2011. Pp. 113-114.
80. Frolova N.S. The facility for registration of variability of the stormglass physico-chemical system characteristics. Patent RF, no. 141806, 2014.
81. Stepanyuk I. A., Frolova N. S., Zimin A.V. The relationship between the stormglass characteristics and electromagnetic disturbances. *Morskoy Vestnik*, 2013, no. 2 (46), pp. 91-92.

**Appendix A** The facility for registration of hydrobionts' motion behavior: Patent RF, no. 148670, 2014.



**Appendix B** The facility for registration of variability of the stormglass physico-chemical system characteristics. Patent RF, no. 141806, 2014.

