

УДК 577.152.34:537.63

## ВЛИЯНИЕ ГИПОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ И ИНВЕРТИРОВАННОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КАЛЬЦИЙ-ЗАВИСИМЫЕ ПРОТЕИНАЗЫ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ И РЫБ

© 2016 г. Н.П. Канцерова<sup>1</sup>, В.В. Крылов<sup>2</sup>, Л.А. Лысенко<sup>1</sup>, Н.В. Ушакова<sup>2</sup>,  
Н.Н. Немова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Россия

<sup>2</sup> Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Ярославская обл., пос. Борок, Россия

Приведены данные о влиянии гипомагнитных условий и инверсии геомагнитного поля на кальций-зависимые протеиназы семейства кальпаинов некоторых видов беспозвоночных животных и рыб в экспериментах *in vivo* и *in vitro*. Установлено, что прижизненная экспозиция исследуемых организмов в гипомагнитных условиях приводит к снижению активности кальпаинов. В отдельных экспериментах тестировали активность препаратов кальций-зависимых протеиназ беспозвоночных и рыб. Показано, что активность препаратов кальпаинов также снижается в гипомагнитных условиях. Результаты экспериментов по влиянию инвертированного геомагнитного поля на кальций-зависимые протеиназы не позволили однозначно описать характер ответной реакции исследуемых ферментов на данное воздействие.

*Ключевые слова:* гипомагнитные условия, инвертированное геомагнитное поле, кальций-зависимые протеиназы, беспозвоночные, рыбы.

PACS 87.14.ej, 87.50.C-

### Введение

Геомагнитное поле (ГМП) – важный экологический фактор, сопутствующий эволюции жизни на Земле. Параметры ГМП варьировали в разные периоды геологической истории [Bogue, Glen, 2010]. Так, с интервалом от десятков тысяч до десятков миллионов лет происходили инверсии полюсов ГМП – изменение местоположения Северного и Южного магнитных полюсов [Cande, Kent, 1995; Huestis, Acton, 1997]. Периодичности в смене полюсов обнаружено не было, этот процесс считается стохастическим

[Lutz, 1985]. Продолжительность инверсий составляет в среднем от 100 до 1000 лет [Вадковский и др., 1980].

Некоторые исследователи полагают, что во время смены полюсов магнитосфера Земли сильно ослабевает, и космическое излучение достигает поверхности планеты. С этим связывают массовые вымирания биологических видов, которые в геологической летописи приходятся на момент инверсий [Hays, 1971; Meert et al., 2016]. Само изменение геомагнитного поля во время инверсии также оказывает значительное воздействие на различные биологические объекты. Подтверждением этому служат результаты работ по изучению влияния гипомагнитных условий [Asashima et al., 1991; Бинги, 2002; Бинги и др., 2006; Mo et al., 2014; Ходанович и др., 2013; Krylov, Osipova, 2013; Jia et al., 2014] и инвертированного ГМП [Krylov, Osipova, 2013; Кузьмина и др., 2015] на различные поведенческие, морфологические, физиологические параметры растительных и животных организмов. Некоторые данные указывают на то, что процесс инверсии геомагнитного поля может происходить довольно быстро. Результаты исследования древних магматических пород в горах Шип Крик Рендж (штат Невада, США) показывают, что скорость поворота магнитного поля Земли составляла  $1^\circ$  в сутки [Bogue, Glen, 2010]. Анализ остаточной намагниченности древних магматических пород в горах Стинс-Маунтин (штат Орегон, США) показал, что скорость поворота магнитного поля Земли во время остывания лавового потока достигала  $6^\circ$  в сутки [Coe et al., 1995]. Если инверсия геомагнитного поля будет происходить постоянно с такой скоростью, то магнитные полюса поменяются приблизительно за 1 мес.

В связи с вышеизложенным исследование влияния гипомагнитных условий (существенного ослабления ГМП) и инверсии ГМП на различные функциональные показатели живых организмов представляется весьма актуальным. Необходимость подобных исследований связана также с тем, что в современном мире существенное ослабление ГМП и изменение его направления можно обнаружить в метро, в экранированных сооружениях на радиотехнических и радиоэлектронных производствах, в космосе [Бинги, 2002].

Следует отметить, что влияние ГМП на биохимические процессы в живых организмах изучено пока недостаточно. В доступной нам литературе мы обнаружили единичные указания на изменение некоторых биохимических показателей у животных и человека при ослаблении и изменении направления ГМП [Ciorba, Morariu, 2001; Кузьмина и др., 2015]. Вместе с тем биохимические методы позволяют регистрировать изменения метаболизма, наступающие, как правило, до появления физиологических, морфологических и других отклонений от нормы [van der Oost et al., 2003]. Внутриклеточные кальций-зависимые протеиназы и их регуляторы в ряде экспериментов с организмами разных таксономических групп показали высокую чувствительность к воздействию различных факторов окружающей среды, включая геомагнитные возмущения и комбинированные магнитные поля [Канцерова и др., 2013; 2015; Krylov et al., 2014]. Ответная реакция со стороны кальций-зависимых протеиназ была обнаружена как после прижизненной экспозиции биологических объектов, так и после экспозиции частично очищенных ферментативных препаратов в исследуемых факторах. Проведение экспериментов *in vitro* позволило установить способность кальций-зависимых протеиназ непосредственно воспринимать воздействие геомагнитных возмущений и комбинированных магнитных полей.

Целью настоящей работы является изучение влияния гипомагнитных условий и инверсии ГМП на препараты внутриклеточных кальций-зависимых протеолитических ферментов семейства кальпаинов у некоторых беспозвоночных животных и рыб, а также на активность этих ферментов после прижизненной экспозиции биологических объектов.

## Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовались рыбы семейства карповых – карась *Carassius carassius* (L.) (возраст – 1+, длина –  $6.0 \pm 0.3$  см, масса –  $3.8 \pm 0.4$  г), плотва *Rutilus rutilus* (L.) (возраст – 0+, длина –  $7.5 \pm 0.1$  см, масса –  $5.1 \pm 0.3$  г), карп *Cyprinus carpio* L. (возраст – 0+, длина –  $4.5 \pm 0.2$  см, масса –  $1.6 \pm 0.2$  г), брюхоногий моллюск прудовик *Limnaea stagnalis* L. (высота раковины –  $2.5 \pm 0.4$  см) из прудов экспериментального хозяйства «Сунога» Института биологии внутренних вод (ИБВВ) им. И.Д. Папанина РАН и особи дафнии *Daphnia magna* Straus (высота тела –  $2.37 \pm 0.16$  м) из лабораторной культуры [Методика..., 1999]. Выловленная рыба и прудовики содержались в аквариумах с аэрируемой водой при температуре  $18 \pm 2$  °С не менее 5 сут до начала эксперимента для адаптации к лабораторным условиям. Животные случайным образом были разделены на группы – опытные и контрольные. Каждая экспериментальная группа содержала 7 особей рыб или моллюсков и не менее 150 особей дафний. Оценка энзиматической активности кальпаинов была проведена отдельно для каждой рыбы и в пяти общих гомогенатах тела дафний (содержащих по 30 особей).

Для создания гипомангнитных условий и инверсии ГМП использовались кольца Гельмгольца (диаметр – 0.5 м) и источник постоянного тока АКПП-1103 фирмы «Manson Eng. Indust. Ltd», Китай. Перед каждым экспериментом и по его окончании при помощи трехкомпонентного магнитометра НВ0599Б (НПО «ЭНТ», Россия) определялись величина индукции и направление ГМП в месте проведения экспериментов (интенсивность – 51.7 мкТл, наклонение – 72.05°). После этого система колец Гельмгольца размещалась таким образом, чтобы ее ось совпала с направлением ГМП. Для создания гипомангнитных условий на обмотку колец подавался ток такой силы, чтобы генерируемое магнитное поле (МП) было равным по силе, но противоположным по направлению ГМП. При этом в центре системы за счет суперпозиции генерируемое постоянное МП в значительной степени компенсировало ГМП. Для генерации инвертированного ГМП на обмотку колец подавался ток такой силы, чтобы генерируемое МП было вдвое сильнее и направлено противоположно ГМП. В качестве контроля для всех экспериментов использовалось ГМП.

На первом этапе эксперимента исследовали активность внутриклеточных кальций-зависимых протеиназ после прижизненной экспозиции биологических объектов в исследуемых факторах. Карасей экспонировали в инвертированном ГМП и гипомангнитных условиях *in vivo* в течение 1 ч (опытные группы), особи контрольной группы находились в ГМП. По истечении заданного периода у рыб изымали для анализа ткани скелетных мышц и головного мозга и помещали в жидкий азот до биохимического анализа. Образцы тканей гомогенизировали в ступке с толченым стеклом в 20 мМ Трис–HCl буфере (рН 7.5) с добавлением 150 мМ NaCl, 5 мМ EDTA-Na<sub>2</sub>, 20 мМ DTT, 0.1 % Тритона X-100, затем полученные гомогенаты центрифугировали при 20 000 g в течение 20 мин (центрифуга Rotina 35R фирмы «Hettich Zentrifugen», Германия). В супернатанте (ферментсодержащей фракции) тестировали активность кальпаинов – кальций-зависимую казеинолитическую активность [Enns, Belcastro, 2006]. Реакционная смесь включала 1 мг/мл щелочно-денатурированного казеина, 20 мМ DTT, 200 мкл ферментсодержащей фракции и 5 мМ CaCl<sub>2</sub> (опыт) или хелатора двухвалентных катионов EDTA-Na<sub>2</sub> (холостая проба) в 50 мМ Трис–HCl буфере (рН 7.5). После 30-минутной инкубации (28 °С) в аликвотах объемом 100 мкл определяли содержание остаточного белка по методу Бредфорда [Bradford, 1976]. Единицу активности (ед. акт.) кальпаинов определяли спектрофотометрически (СФ-2000, ЗАО «ОКБ-Спектр», Россия) как количество фермента, вызывающее увеличение оптического поглощения при 595 нм на 0.1 ОЕ за 1 ч инкубации при 28 °С. Удельную активность кальпаинов рассчитывали на 1 г белка.

На втором этапе эксперимента экспонировали препараты кальций-зависимых протеиназ интактных рыб и беспозвоночных животных в гипомагнитных условиях и инвертированном ГМП. Частично очищенные препараты получали описанным выше способом (гомогенизацией ткани с последующим центрифугированием гомогената). Сразу после получения препараты кальций-зависимых протеиназ интактных рыб и беспозвоночных инкубировали в реакционной смеси указанного выше состава в стандартных условиях (28 °С, 30 мин) в инвертированном ГМП и гипомагнитных условиях (опыт), а также в условиях постоянного ГМП (контроль).

Полученные в ходе экспериментов результаты были обработаны с применением общепринятых методов вариационной статистики; распределение данных отличалось от нормального, поэтому достоверность различий оценивали с помощью непараметрического критерия *U* (критерий Манна–Уитни). Эти данные приведены в табл. 1–3 настоящей статьи как среднее  $\pm$  ошибка среднего.

### Результаты экспериментов

Проведенные нами исследования показали, что в мышцах и мозге карасей, экспонированных в гипомагнитных условиях в течение 1 ч, активность кальций-зависимых протеиназ снизилась соответственно в 4.1 и 2.2 раза по сравнению с контролем (табл. 1). При воздействии гипомагнитных условий *in vitro* было обнаружено достоверное снижение активности кальций-зависимых протеиназ из мягкого тела прудовика в 3.3. раза, скелетных мышц карпа – в 3.4 раза по сравнению с контрольными значениями (табл. 2).

Установлено, что экспозиция карася в инвертированном ГМП не оказывает влияния на активность кальций-зависимых протеиназ в его органах (см. табл. 1). При воздействии инвертированного ГМП на кальпаины из мягкого тела прудовика было обнаружено достоверное снижение их активности, вместе с тем активность препаратов изучаемых протеиназ, выделенных из дафний и скелетных мышц плотвы, достоверно не изменилась (табл. 3).

**Таблица 1.** Удельная активность кальций-зависимых протеиназ в органах карася, экспонированного в ГМП (контроль), в гипомагнитных условиях и в инвертированном ГМП, ед. акт. / г белка

Орган	Контроль	Гипомагнитные условия	Контроль	Инвертированное ГМП
Скелетные мышцы	54.88 $\pm$ 8.35	13.37 $\pm$ 5.10*	59.58 $\pm$ 9.36	54.14 $\pm$ 16.60
Головной мозг	152.67 $\pm$ 22.80	68.63 $\pm$ 12.93*	135.84 $\pm$ 8.83	96.65 $\pm$ 50.26

\*Отличие от контроля достоверно при  $p \leq 0.05$ .

**Таблица 2.** Удельная активность препаратов кальций-зависимых протеиназ, выделенных из мягкого тела прудовика и скелетных мышц карпа и подвергнутых воздействию гипомагнитных условий, ед. акт. / г белка

Вид	Контроль	Гипомагнитные условия
Прудовик	178.71 $\pm$ 24.53	53.86 $\pm$ 10.31*
Карп	82.32 $\pm$ 17.73	24.14 $\pm$ 11.40*

\*Отличие от контроля достоверно при  $p \leq 0.05$ .

**Таблица 3.** Удельная активность препаратов кальций-зависимых протеиназ, выделенных из мягкого тела прудовика, дафний, скелетных мышц плотвы и подвергнутых воздействию инвертированного ГМП, ед. акт. / г белка

Вид	Контроль	Инвертированное ГМП
Прудовик	202.46±18.12	51.12±13.70*
Дафния	144.55±17.07	64.68±30.75
Плотва	57.81±7.42	39.17±16.79

\*Отличие от контроля достоверно при  $p \leq 0.05$ .

### Обсуждение результатов

Полученные в ходе наших экспериментов результаты согласуются с имеющимися в научной литературе данными о влиянии гипوماгнитных условий на некоторые биохимические показатели живых организмов, что, в частности, выражается в снижении протеолитической и амилолитической активности слизистой оболочки кишечника карася при воздействии в течение 1 ч нулевого магнитного поля [Кузьмина и др., 2015], снижении активности аминотрансфераз сыворотки крови человека в результате 72-часовой экспозиции в гипوماгнитных условиях [Ciorba, Morariu, 2001].

Кроме того, установлено влияние гипوماгнитных условий и на другие биологические показатели. Так, в ходе культивирования первичных эмбриональных фибробластов мышцы в нулевом магнитном поле было отмечено снижение жизнеспособности клеток и их способности к адгезии, изменение морфологии монослоя [Осипенко и др., 2008]. Экспозиция личинок японского тритона в магнитном вакууме в течение 5 дней приводила к общему замедлению развития, неправильному формированию позвоночника, глаз [Asashima et al., 1991]. Наличие гипوماгнитных условий усугубляло снижение минеральной плотности костной ткани в условиях невесомости [Jia et al., 2014]. Экспозиция дрозофилы в гипوماгнитных условиях на протяжении нескольких поколений приводила к ухудшению памяти и способности к обучению [Zhang et al., 2004]. Описано возрастание межвидовой агрессивности крыс уже после 1 суток пребывания в условиях экранирования ГМП [Темурьянц и др., 2014]. Многосуточное нахождение в гипوماгнитных условиях вызывало у крыс угнетение ЦНС, что проявлялось в снижении двигательной активности, а также уровня нейрональной активации [Гуль, 2014]. Гипوماгнитные условия ослабляют когнитивную деятельность человека, что выражается в росте числа ошибок и замедлении прохождения тестовых заданий [Саримов и др., 2008]. Наблюдения за людьми, вынужденными длительное время находиться в условиях ослабленного ГМП (в метро, самолетах, космических аппаратах, военной технике и т.д.), показали ухудшение деятельности сердечно-сосудистой и вегетативной нервной систем, снижение работоспособности [Любимов, Рагульская, 2004].

В настоящее время предлагается несколько моделей влияния ГМП и его вариаций на организм [Бинги, 2002; Леднев и др., 2003; Крылов и др., 2014]. Геомагнитное поле также рассматривается в качестве постоянной составляющей комбинированных магнитных полей в интерференционных моделях воздействия слабых магнитных полей на биологические системы [Белова, Панчелюга, 2010]. Компенсация ГМП, таким образом, может модулировать множество биологических процессов, так или иначе зависящих от магнитной составляющей. Вероятно, данным обстоятельством можно объяснить выраженную однозначную реакцию исследуемых ферментных систем на действие гипوماгнитных условий. Тот факт, что препараты изучаемых ферментов также реагируют на низкое ГМП, указывает на способность кальций-зависимых протеиназ непосредственно воспринимать магнитное воздействие.

Таким образом, снижение активности кальпаинов в гипомагнитных условиях является специфическим ответом на данный тип воздействия, который может привести к нарушению многих кальпаин-зависимых процессов в клетке. Известно, что регуляторный потенциал кальпаинов распространяется на процессы сигнальной трансдукции, пролиферации, дифференцировки, апоптоза, некроза и другие клеточные события [Goll *et al.*, 2003; Лысенко *и др.*, 2011].

Результаты экспериментов по изучению влияния инвертированного геомагнитного поля на кальций-зависимые протеиназы беспозвоночных и рыб не позволили однозначно описать характер ответной реакции исследуемых ферментов на данное воздействие. Не было также найдено объяснение обнаруженных различий в ответной реакции протеолитических и амилолитических ферментов слизистой оболочки кишечника рыб на воздействие инвертированного ГМП (активность первых снижалась, а вторых, напротив, увеличивалась) [Кузьмина *и др.*, 2015]. Полученные нами результаты и их сопоставление с немногими доступными литературными данными свидетельствуют о необходимости дальнейшего изучения биологических эффектов инверсии ГМП на живые организмы.

### Заключение

Полученные в ходе проведенных авторами экспериментов по изучению влияния гипомагнитных условий и инверсии ГМП на кальций-зависимые протеиназы некоторых беспозвоночных и рыб результаты свидетельствуют о том, что данные ферменты способны непосредственно воспринимать магнитное воздействие. Можно предположить, что индуцированная гипомагнитными условиями супрессия кальций-зависимого протеолиза, обнаруженная нами у изученных организмов, способна негативно отразиться на интенсивности базовых кальпаин-опосредованных процессов в клетке. Вместе с тем результаты экспериментов не дали однозначного ответа о характере воздействия инверсии ГМП на кальций-зависимые протеиназы из органов рыб и беспозвоночных животных. Результаты проведенного нами исследования важны для понимания роли ГМП как фактора естественной среды обитания, а также для оценки влияния искусственных гипомагнитных условий, встречающихся в современном мире, на различные функциональные показатели человека и животных.

### Благодарности

Исследование выполнено с помощью приборов Центра коллективного пользования научным оборудованием Института биологии Карельского научного центра РАН. Финансовое обеспечение проведенных исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания № 0221-2014-0003 и при поддержке гранта Президента РФ МК-4737.2016.4.

### Литература

- Белова Н.А., Панчелюга В.А. Модель В.В. Леднева: Теория и эксперимент // Биофизика. 2010. Т. 55, вып. 4. С. 750–766.
- Бинги В.Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. М.: Милта, 2002. 592 с.
- Бинги В.Н., Миляев В.А., Саримов Р.М., Заруцкий А.А. Влияние электростатического и «нулевого» магнитного полей на психофизиологическое состояние человека // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. № 8–9. С. 48–58.

- Вадковский В.Н., Гурарий Г.З., Мамиконьян М.Р. Анализ процесса смены знака геомагнитного поля // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1980. № 7. С. 55–69.
- Гуль Е.В. Поведение и функциональное состояние ЦНС крыс после пребывания в моделируемых гипогеомагнитных условиях: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск: ТГУ, 2014. 23 с.
- Канцерова Н.П., Лысенко Л.А., Ушакова Н.В., Крылов В.В., Немова Н.Н. Модуляция  $\text{Ca}^{2+}$ -зависимого протеолиза при действии слабых низкочастотных магнитных полей // Биооргани. химия. 2015. Т. 41, № 6. С. 725–730.
- Канцерова Н.П., Ушакова Н.В., Крылов В.В., Лысенко Л.А., Немова Н.Н. Влияние слабых низкочастотных магнитных полей на внутриклеточные кальций-зависимые протеиназы рыб // Изв. РАН. Сер. биол. 2013. № 6. С. 668–672.
- Крылов В.В., Осипова Е.А., Изюмов Ю.Г. Ориентационное поведение животных в геомагнитном поле и механизмы магниторецепции // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 4. С. 60–81.
- Кузьмина В.В., Ушакова Н.В., Крылов В.В. Влияние магнитных полей на активность протеиназ и гликозидаз кишечника карася *Carassius carassius* // Изв. РАН. Сер. биол. 2015. № 1. С. 70–76.
- Леднев В.В., Белова Н.А., Рождественская З.Е., Тирас Х.П. Биоэффекты слабых переменных магнитных полей и биологические предвестники землетрясений // Геофизические процессы и биосфера. 2003. Т. 2, № 1. С. 3–11.
- Лысенко Л.А., Немова Н.Н., Канцерова Н.П. Протеолитическая регуляция биологических процессов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 482 с.
- Любимов В.В., Рагульская М.В. Электромагнитные поля, их биотропность и нормы экологической безопасности // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 3. С. 74–80.
- Методика определения токсичности воды по смертности и изменению плодовитости дафний. М.: Акварос, 1999. 50 с.
- Осипенко М.А., Межевикина Л.М., Крастс И.В., Яшин В.А., Новиков В.В., Фесенко Е.Е. Влияние «нулевого» магнитного поля на рост эмбриональных клеток и ранних зародышей мышей в культуре *in vitro* // Биофизика. 2008. Т. 53, № 4. С. 705–714.
- Саримов Р.М., Бинги В.М., Миляев В.А. Влияние компенсации геомагнитного поля на когнитивные процессы человека // Биофизика. 2008. Т. 53, № 5. С. 856–866.
- Темурьянц Н.А., Туманянц К.Н., Костюк А.С., Хусаинов Д.Р., Чертаев И.В., Чайка А.В. Участие опиоидной системы в изменении агрессивного поведения крыс в условиях электромагнитного экранирования // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. 2014. Т. 27 (66), № 3. С. 160–168.
- Ходанович М.Ю., Гуль Е.В., Зеленская А.Е., Пан Э.С., Кривова Н.А. Влияние длительного ослабления геомагнитного поля на агрессивность лабораторных крыс и активацию опиоидергических нейронов // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2013. № 1 (21). С. 146–160.
- Asashima M., Shimada K., Pfeiffer C. Magnetic shielding induces early developmental abnormalities in the Newt, *Cynops pyrrhogaster* // Bioelectromagnetics. 1991. V. 12. P. 215–224.
- Bogue S.W., Glen J.M.G. Very rapid geomagnetic field change recorded by the partial remagnetization of a lava flow // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L21308.
- Bradford M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // Anal. Biochem. 1976. V. 72. P. 248–254.
- Cande S.C., Kent D.V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 6093–6095.
- Ciorba D., Morariu V.V. Life in zero magnetic field. III. Activity of aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase during *in vitro* aging of human blood // Electro- and Magnetobiol. 2001. V. 20, N 3. P. 313–321.

- Coe R.S., Prévot M., Camps P. New evidence for extraordinarily rapid change of the geomagnetic field during a reversal // *Nature*. 1995. V. 374. P. 687–692.
- Enns D.L., Belcastro A.N. Early activation and redistribution of calpain activity in skeletal muscle during hindlimb unweighting and reweighting // *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 2006. V. 84. P. 601–609.
- Goll D.E., Thompson V.F., Li H., Wei W., Cong J. The calpain system // *Physiol. Rev.* 2003. V. 83, N 3. P. 731–801.
- Hays J.D. Faunal extinctions and reversals of the Earth's magnetic field // *Geol. Soc. of Amer. Bull.* 1971. V. 82, N 9. P. 2433–2447.
- Huestis S.P., Acton G.D. On the construction of geomagnetic timescales from non-prejudicial treatment of magnetic anomaly data from multiple ridges // *Geophys. J. Int.* 1997. V. 129. P. 176–182.
- Jia B., Xie L., Zheng Q., Yang P., Zhang W., Ding C., Qian A., Shang P. A hypomagnetic field aggravates bone loss induced by hindlimb unloading in rat femurs // *PLoS ONE*. 2014. V. 9(8): e105604.
- Krylov V.V., Osipova E.A. The response of European *Daphnia magna* Straus and Australian *Daphnia carinata* King to changes in geomagnetic field // *Electromagn. Biol. Med.* 2013. V. 32 (1). P. 30–39.
- Krylov V.V., Zotov O.D., Klain B.I., Ushakova N.V., Kantserova N.P., Znobishcheva A.V., Izyumov Yu.G., Kuz'mina V.V., Morozov A.A., Lysenko L.A., Nemova N.N., Osipova E.A. An experimental study of the biological effects of geomagnetic disturbances: The impact of a typical geomagnetic storm and its constituents on plants and animals // *J. Atmosph. Solar-Terrestrial Phys.* 2014. V. 110–111. P. 28–36.
- Lutz T.M. The magnetic reversal record is not periodic // *Nature*. 1985. V. 317. P. 404–407.
- Meert J.G., Levashova N.M., Bazhenov M.L., Landing E. Rapid changes of magnetic Field polarity in the late Ediacaran: Linking the Cambrian evolutionary radiation and increased UV-B radiation // *Gondwana Res.* 2016. V. 34. P. 149–157.
- Mo W., Liu Y., Bartlett P., He R. Transcriptome profile of human neuroblastoma cells in the hypomagnetic field // *Sci. China*. 2014. V. 57, N 4. P. 448–461.
- van der Oost R., Beyer J., Vermeulen N.P.E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 2003. V. 13. P. 57–149.
- Zhang B., Lu H., Xi W., Zhou X., Xu S., Zhang K., Jiang J., Li Y., Guo A. Exposure to hypomagnetic field space for multiple generations causes amnesia in *Drosophila melanogaster* // *Neurosci. Lett.* 2004. V. 371. P. 190–195.

#### Сведения об авторах

**КАНЦЕРОВА Надежда Павловна** – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологии Карельского научного центра РАН. 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11. Тел.: +7 (8142) 76-98-10. E-mail: nkantserova@yandex.ru

**КРЫЛОВ Вячеслав Владимирович** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт биологии внутренних вод им И.Д. Папанина РАН. 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109. Тел.: +7 (48-547) 24-214. E-mail: kryloff@ibiw.yaroslavl.ru

**ЛЫСЕНКО Людмила Александровна** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт биологии Карельского научного центра РАН. 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11. Тел.: +7 (8142) 76-98-10. E-mail: l-lysenko@yandex.ru

**УШАКОВА Наталья Владимировна** – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологии внутренних вод им И.Д. Папанина РАН. 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109. Тел.: +7 (48-547) 24-214. E-mail: nvushakova@rambler.ru

**НЕМОВА Нина Николаевна** – член-корреспондент РАН, директор, Институт биологии Карельского научного центра РАН. 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11. Тел.: +7 (8142) 76-98-10. E-mail: nemova@krc.karelia.ru

## THE EFFECTS OF HYPOMAGNETIC CONDITIONS AND REVERSED GEOMAGNETIC FIELD ON THE CALCIUM-DEPENDENT PROTEASES OF INVERTEBRATES AND FISH

N.P. Kantserova<sup>1</sup>, V.V. Krylov<sup>2</sup>, L.A. Lysenko<sup>1</sup>, N.V. Ushakova<sup>2</sup>, N.N. Nemova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Biology of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

<sup>2</sup> Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Russia

**Abstract.** The effects of hypomagnetic conditions and reversal of the geomagnetic field on intracellular Ca<sup>2+</sup>-dependent proteases (calpains) of fish and invertebrates were studied *in vivo* and *in vitro*. It was found that the intravital exposure of examined animals to hypomagnetic conditions led to a significant decrease in its calpain activity. The activity of preparations of calcium-dependent proteases was tested in separate experiments. It was shown that preparations of Ca<sup>2+</sup>-dependent proteases from invertebrates and fish was also inactivated substantially at the effect of hypomagnetic conditions. Ambiguous results obtained in the experiments with the reversed geomagnetic field did not allow us to discuss biological response of calcium-dependent proteases to the reversal of the geomagnetic field.

**Keywords:** hypomagnetic conditions, reversed geomagnetic field, calcium-dependent proteases, invertebrates, fish.