

**Воробьев Валерий Васильевич**,  
доктор технических наук, академик РАЕН, эксперт,  
ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных»,  
г. Владимир  
Vorobyov V.V.,  
Doctor of Technical Sciences, Academician  
of the Russian Academy of Sciences, expert,  
FSBI "Federal Center for Animal Health Protection", Vladimir

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА НЕРЕСТ И ВОСПРОИЗВОДСТВО ТИХООКЕАНСКИХ ЛОСОСЕЙ

**Аннотация:** Показана взаимосвязь электромагнитного поля Земли с врожденно-биогенным хомингом через содержащиеся в черепе лососёвых рыб кристаллы магнетита, на ориентацию и миграцию популяций тихоокеанских лососей рода *Oncorhynchus* на нагул в тихоокеанские просторы и на нерест в многолетние речные «родовые гнезда» для воспроизводства здорового потомства. Приведена система электромагниточувствительности, основанная на использовании биогенного магнетита у лососей и других видов рыб. Эпифиз и таламус биологических организмов и рыб воспринимает информацию об изменении индукции электромагнитного поля Земли по нервной и гуморальной системе. Во время миграции лососи распознают свои точные географические координаты и чётко ориентируются, обладают врожденными «биологическими часами» для точного определения местоположения в открытой морской воде.

**Ключевые слова:** тихоокеанский лосось, электромагнитное поле Земли, магнетит, хоминг, ориентация, миграция, нерест.

### ВВЕДЕНИЕ

За последние полвека в российских и зарубежных научных публикациях активно обсуждаются причины сокращения численности природных лососёвых стад в северном бассейне Тихого океана и прилегающих морях российского Дальнего Востока. В эпоху индустриальной экономики и глобального агрессивного эколого-правового нигилизма многолетняя безнадежная борьба природных лососей за водную среду обитания свидетельствует о реально возрастающей угрозе полного исчезновения тихоокеанских лососей в Северной Пацифике. Наиболее существенной причиной сокращения численности популяций тихоокеанских лососей называют необоснованное научно массовое развитие в Канаде, США, Японии, Южной Корее и России системы лососёвых рыбоводных заводов, спровоцировавшее образование негативных эколого-эпигенетических, экономических и социальных последствий от крупномасштабного искусственного воспроизводства всех видов лососей рода *Oncorhynchus*.

К агрессивному антропогенному воздействию при искусственном культивировании тихоокеанских лососей относят многофакторное эпигенетическое влияние на трансформацию эмбриогенеза и онтогенеза, снижающее жизнестойкость и воспроизводство здорового потомства при утрате врожденно-навигационного инстинкта – хоминга, значительно сокращающее численность популяций лососей. Механизм приобретённого при рождении биогенного хоминга позволяет природным лососям фактически безошибочно возвращаться в свою родовую реку или водоём, где «в многолетнем родовом гнезде» была заложена «родителями» рода *Oncorhynchus* оплодотворённая икра в нерестовые галечные бугры, происходило эмбриональное развитие до



личинки с последующим их выходом на плав, пестряток и смолтов на естественном природном корме до скатывания молоди лососей в прибрежные морские акватории и миграции для нагула в океан. На основе феномена хоминга тихоокеанских лососей базируется научное прогнозирование подходов рыбы к основным рекам, озёрам и районам нереста, определяется допустимый объём промышленного промысла, который не всегда подтверждается. Так, например, просчёты в прогнозах в охотоморские районы Западной Камчатки (1985, 1990 гг.) и морские акватории Сахалина (1982, 1993 гг.), морского побережья Камчатского края и всего Дальневосточного бассейна (2020, 2022, 2024 годы), привели к большим экономическим потерям в рыбной отрасли дальневосточных регионов страны. Массовый невозврат нерестовых природных лососей к «родным» рекам объясняется блужданием – «стреингом», вызванным, по-видимому, резкими изменениями природно-климатических условий (тайфуны, ураганы, землетрясения, цунами и т.п.), чрезмерно-активными вспышками на Солнце и магнитными бурями в биосфере и на Земле, и, в наибольшей степени, приобретёнными врождёнными патологиями в процессе эмбриогенеза и онтогенеза при искусственном культивировании на лососёвых рыболовных заводах.

На все живые биологические организмы в течение всего жизненного цикла воздействует биосфера и электромагнитное поле Земли. Академик В.И. Вернадский рассматривал биосферу Земли с космосом как единый целый организм: *«Жизнь и все живые организмы являются неразрывной закономерной частью биосферы. Сама биосфера – не случайное образование, она отвечает определённой организованности... Она выявляется как планетное явление космического характера»* [1]. В.И. Вернадский и А.Л. Чижевский [1, 2] пришли к общему выводу, что различные электромагнитные факторы земного и космического происхождения играют существенную роль в биосфере. В 1960-1980-х годах исследованиями установлено: *«Естественные электромагнитные поля являются носителями информации в биосфере, обеспечивая согласование процессов жизнедеятельности биологических организмов с регулярными и нерегулярными изменениями разнообразных биотических и абиотических факторов внешней среды»* [3, 4].

Механизмы ориентации взрослых лососей и пути миграции в океане, в прибрежные морские акватории и реки исследуются с 1930-х годов. За последние полвека воздействие антропогенных электромагнитных полей на экосистемы постоянно увеличивается. Количество исследований влияния электромагнитных полей на биологические объекты значительно возросло, так как оно изучено в меньшей степени по сравнению с влияниями других факторов окружающей среды. Изучение изменений в поведении биологических организмов и животных под воздействием электромагнитных полей напрямую связано с исследованием электрорецепции и магниторецепции у представителей различных таксонов [5].

Среди ряда выдвинутых предположений, разработанных исследователями теорий и гипотез, выделяют магнитную и хеморецепторную, объясняющие поведение лососей. Многие бактерии, насекомые, пчёлы, голуби и птицы, дикие животные, рыбы и морские гидробионты используют электрорецепцию и магниторецепцию во взаимодействии с электромагнитным полем Земли для ориентации и навигации в родные места, являющихся основой для воспроизводства потомства и сохранения биоразнообразия на планете.

**Цель работы** – выявить взаимосвязь электромагнитного поля Земли с биогенным хомингом, обуславливающую географически векторно-точную ориентацию миграции популяций тихоокеанских лососей рода *Oncorhynchus* на нагул в океанские просторы и на нерест в речные «родовые гнезда» для воспроизводства здорового потомства.

### **ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ**

Естественное электромагнитное поле Земли (ЭМПЗ), также известное как геомагнитное поле, обусловлено сложным комплексом геофизических процессов, протекающих во внутренних и поверхностных слоях земной коры, в нижних слоях атмосферы,



в ионосфере, а также происходящими процессами в ближнем межпланетном пространстве [6] и на Солнце. Электромагнитное поле планеты генерируется электрическими токами из-за движения конвекционных токов смеси расплавленного железа и никеля во внешнем ядре Земли, выделяющих тепло.

Электромагнитное поле Земли разделяется на **главное** (соответствует малым гармоникам разложения потенциала), **аномальное** и **внешнее** (соответствует увеличенным гармоникам разложения потенциала) [7]. **Главное** электромагнитное поле Земли связано с источником турбулентных движений токов в жидком ядре и составляет 95 % геомагнитного поля, представляется диполем. **Аномальное поле**, составляющее 4 % электромагнитного поля Земли, обусловлено намагниченностью горных пород литосферы планеты. **Внешнее поле**, составляющее 1 % ЭМПЗ, формируется источниками в околоземном пространстве.

Электромагнитное поле Земли оказало влияние на эволюцию и жизненные свойства планеты Земля, биосферу и человека. В последнее время исследованиями убедительно доказано, что у различных организмов – от бактерий до позвоночных – выявляются поведенческие реакции на изменения электромагнитного поля Земли. Это свидетельствует о том, что электромагнитное поле Земли воспринимается живыми биологическими организмами и является существенным компонентом их среды обитания. Всё это в полной мере относится и к человеку. Известно, что люди по-разному реагируют на изменения электромагнитной активности атмосферы, многие очень чувствительны к магнитным бурям. Электромагнитное поле Земли имеет огромное экологическое и жизнедеятельное значение для живых биологических организмов, растительный и минеральный мир, всего человеческого сообщества.

Электромагнитные и электрические среды имеют свои характеристики. Все электромагнитные поля и электротоки делятся по типу источников на два больших класса – естественного и искусственного происхождения. К естественным электромагнитным полям относятся: постоянное естественное электрическое поле, возникающее в земной коре в результате электрохимических и электрокинетических процессов; магнитотеллурическое поле, образующееся вследствие корпускулярного излучения Солнца (солнечного ветра); поле электромагнитных излучений; естественное импульсное электромагнитное поле Земли (ЕИЭМПЗ), как поле механических напряжений вследствие динамических процессов в земной коре. К искусственным полям относятся поля, создаваемые в земной коре принудительно: постоянное (инфранизкочастотное) поле, переменное поле, поле переходных процессов, электроволновое поле.

В любой точке естественное электромагнитное поле Земли может быть представлено трёхмерным вектором, который представляет собой сумму всех магнитных полей, создаваемых источниками внутри Земли и биосферой рис. 1 [8].

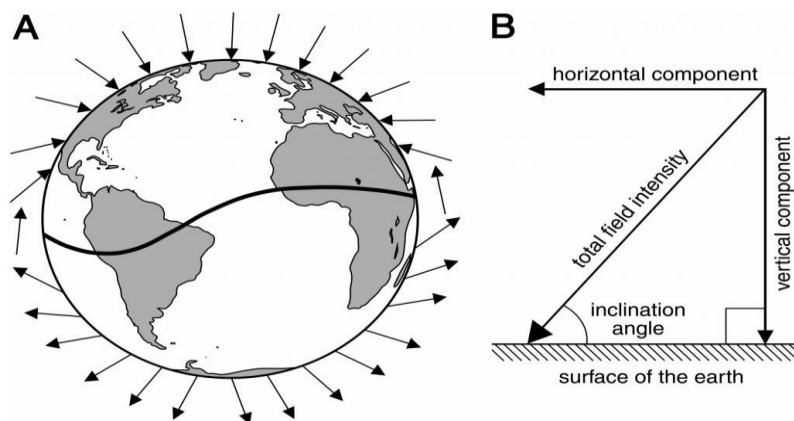


Рис. 1. Диаграмма электромагнитного поля Земли.



(А) Диаграмма, иллюстрирующая, как силовые линии поля (представленные стрелками) пересекают поверхность Земли и как угол inclination (угол, образованный между электромагнитным полем Земли и самой Землёй) меняется в зависимости от широты. На электромагнитном экваторе (изогнутой линии, пересекающей Землю) силовые линии параллельны поверхности Земли. Силовые линии поля становятся все более крутыми по мере продвижения на север к магнитному полюсу, где силовые линии поля направлены прямо в Землю, а угол наклона составляет 90 градусов.

(В) Электромагнитное поле, присутствующее в каждой точке на Земле, описывается в терминах общей интенсивности и угла наклона. (Общая интенсивность электромагнитного поля также может быть разделена на две векторные компоненты – горизонтальную и вертикальную компоненты поля).

#### Характеристики геомагнитного поля

При исследовании и определении физических показателей электромагнитного поля Земли в отдельных точках используется трёхмерная диаграмма. Типичной процедурой измерения его направления является использование компаса для определения направления магнитного Севера. Его угол относительно истинного Севера – это *склонение (D)* или *вариация*. Обращённый к магнитному северу угол, составляющий поле с горизонталью, – это *наклон (I)* или *магнитный провал*. *Напряжённость (F)* поля пропорциональна силе, оказывающей на магнит.

**Напряжённость** или интенсивность электромагнитного поля Земли измеряется в гауссах (G), но обычно указывается в микротеслах (мкТл), при этом  $1 \text{ G} = 100 \text{ мкТл}$ . Карта контуров интенсивности называется *изодинамической диаграммой* (рис. 2 А). Как показывает мировая магнитная модель, интенсивность имеет тенденцию к уменьшению от полюсов к экватору. Минимальная интенсивность наблюдается в Южно-Атлантической аномалии над Южной Америкой, в то время как максимумы наблюдаются над северной Канадой, Сибирью и побережьем Антарктиды к югу от Австралии [9]. Интенсивность электромагнитного поля Земли меняется с течением времени. Палеомагнитное исследование 2021 года, проведённое Ливерпульским университетом, способствовало появлению все большего количества доказательств временного цикла изменений напряжённости электромагнитного поля Земли с шагом 200 млн лет.

**Наклон** или наклонение определяется углом, который может принимать значения от  $-90^\circ$  (вверх) до  $90^\circ$  (вниз). В северном полушарии поле направлено вниз. Оно находится прямо на Северном магнитном полюсе и вращается вверх по мере уменьшения широты, пока не станет горизонтальным ( $0^\circ$ ) на магнитном экваторе. Оно продолжает вращаться вверх, пока не окажется прямо на Южном магнитном полюсе. Наклонение измеряют с помощью наклонного круга.

*Изоклинная диаграмма* (карта контуров наклона) электромагнитного поля Земли представлена на рис. 2 Б.

**Склонение** является положительным при отклонении электромагнитного поля на восток относительно истинного севера. Его можно оценить, сравнив магнитный курс север-юг по компасу с направлением на небесный полюс. Карты обычно содержат информацию о склонении в виде угла или небольшую диаграмму, показывающую соотношение между магнитным севером и истинным севером. Информация о склонении для региона может быть представлена в виде диаграммы с *изогональными* линиями (контурные линии, каждая из которых представляет фиксированное склонение) на рис. 2 В.





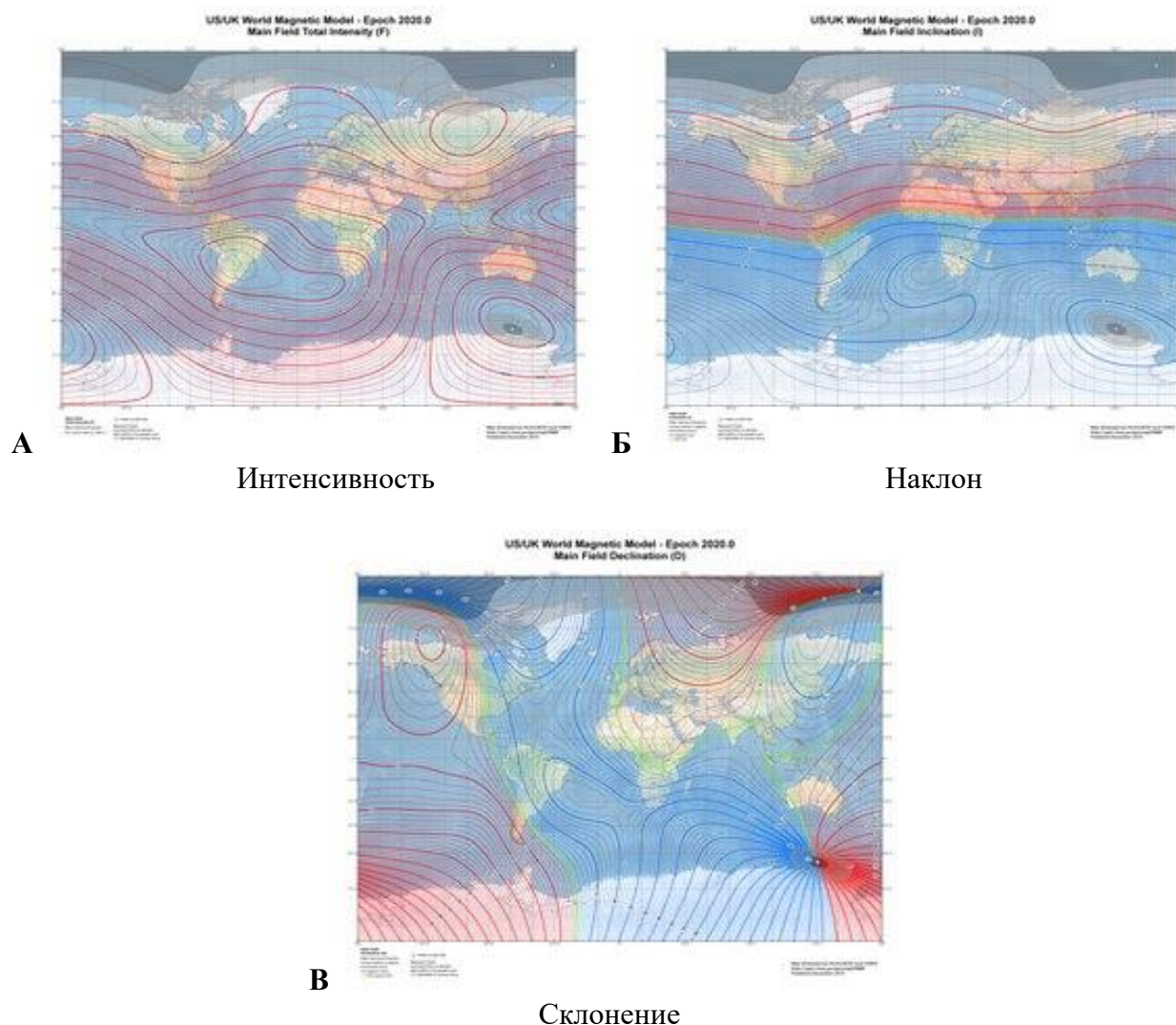


Рис. 2. Компоненты электромагнитного поля Земли на поверхности из Мировой магнитной модели на 2020 год [9].

На большей части земного шара градиенты общей интенсивности (*напряжённости*) электромагнитного поля и угла наклона (*угол, под которым силовые электромагнитные линии пересекают поверхность Земли*) образуют двумерную координатную сетку, по которой определяют широту и долготу объекта искомой точки. Для животных, птиц и рыб способных определять географический север, склонение (*угловая разница между географическим и магнитным севером*) также является компонентом координатной магнитной сетки.

Величина индукции электромагнитного поля Земли (*напряжённости*) на её поверхности изменяется от 25 до 65 мкТл (от 0,25 до 0,65 Г) от экватора к полюсам, а её направление в южном и северном полушариях различно. Кроме того, на электромагнитное поле Земли могут накладываться магнитные поля, порождаемые намагничённостью горных пород, создавая так называемые магнитные аномалии.

**Океаны** вносят определённый вклад в формирование электромагнитного поля Земли. Морская вода является электрическим проводником и взаимодействует с электромагнитным полем Земли. Поскольку приливы и отливы циркулируют вокруг океанских бассейнов, водные массы океанов обусловлено пытаются вытянуть линии электромагнитного поля Земли вперёд. Морская солёная вода обладает низким значением проводимости, поэтому взаимодействие



относительно слабое: самый сильный компонент приходится на регулярные лунные приливы, происходящие два раза в день. Значительный вклад в напряжённость электромагнитного поля Земли вносят океанские волны, водовороты и цунами [10]. Сила взаимодействия электромагнитного поля Земли зависит от температуры воды во всех океанах.

Океаны значительно влияют на формирование электромагнитного поля Земли, отличающиеся от суши своими «зевровидным» полосами магнитных аномалий, вследствие восходящих потоков внутри земной мантии через раздвигающуюся литосферу и образование срединно-океанских хребтов, из которых через трещины изливаются базальтовые лавы. Расплавленные массы подземной магмы, поднимаясь по каналам и разломам в оси срединно-океанского хребта, остывают и намагничиваются в соответствии с направлением и величиной электромагнитного поля, существующими в данный момент времени. Заполнив трещину в срединно-океанских хребтах, магма остывает и превращается в кристаллическую горную породу, обновляя океаническую литосферу [11].

Естественное электромагнитное поле планеты колеблется в незначительных пределах (амплитуда флуктуаций редко превышает 1% от величины поля). Эти флуктуации, включая геомагнитные бури, являются в основном результатом взаимодействия магнитосферы Земли с корпускулярными веществами солнечного ветра. Они связаны с суточным обращением планеты вокруг своей оси и со вспышечной активностью Солнца [12]. Электромагнитному полю Земли свойственна также суточная вариация: изменение напряжённости с периодом в 24 часа, вызванное изменениями освещённости планеты в течение суток [13].

В последнее столетие заметным фактором окружающей среды стали магнитные поля искусственного происхождения. Напряжённость, частота и направление электромагнитных полей (ЭМП) антропогенного происхождения варьируют в очень широких пределах [14]. При этом ЭМП, соизмеримые с электромагнитным полем Земли или с полями, создаваемыми работающим технологическим, техническим, лабораторным оборудованием, могут оказывать значительное воздействие на различные физические, морфологические, биохимические, генетические и другие показатели живых биологических организмов [15].

### **ВОСПРИЯТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ГИДРОБИОНТАМИ**

Наиважнейшее свойство живой материи – электрическая активность. Электричество генерируют нервные, мышечные и железистые клетки всех живых существ, поскольку основные процессы в нервных тканях – возбуждение и торможение – сопровождаются электрическими явлениями. Экспериментально обнаружены электрические поля вокруг нервов, мышц и сердца лягушки и других земноводных, а также вокруг комара и шмеля во время их полёта. Способность излучать электричество наиболее развита у рыб.

#### **Электрорецепция и магниторецепция у рыб**

В 1678 году, проводя вскрытие акул, итальянский врач Стефано Лоренцини обнаружил специфические органы на их головах, которые называются ампулами Лоренцини. Он опубликовал свои результаты в *Osservazioni intorno alle torpedini* [16]. В 1960 году Р.У. Мюрреем была установлена электрорецептивная функция этих органов [17]. Электрорецепция и электрогенез у гидробионтов и земноводных животных тесно связанные биологические функции воспринимать электрические стимулы и генерировать электрические поля, используемые для локации и обнаружения добычи.

У **пластиножаберных рыб** (акул, скатов и др.) имеются высокочувствительные электрорецепторы – ампулы Лоренцини [18, 19, 20], выполняющие функцию восприятия слабых внешних электрических полей биологического и абиотического происхождения [21]. Kalmijn A.J. в 1984 г. обосновал теорию использования электрорецепторов ампул Лоренцини для ориентации в электромагнитном поле Земли [22]. В соответствии с принципом электромагнитной индукции, при передвижении рыбы в геомагнитном поле индуцируется



электрическое поле, регистрируемое ампулами Лоренцини. Неравномерное движение приводит к индукции определённого электрического поля, и если рыба изменит направление движения относительно электромагнитного поля Земли, то изменятся параметры индуцируемого поля.

Проведённые опыты со скатами *Trygon pastinaca* (L.) из Чёрного моря подтверждают теоретические выкладки. Экспериментально установлено, что афферентные нервы ампулярных электрорецепторов на крыльях ската и некоторые зоны мозга отвечали, как на электрическое, так и на магнитное воздействие [23, 24]. Возбуждение и торможение в нерве возникало, когда магнитное поле изменялось во времени, если рыба не двигалась, или при движении ската в постоянном магнитном поле. Если рыба движется в градиенте электромагнитного поля, то электрические поля, воспринимаемые ампулярными органами в различных частях тела рыбы, будут различными по величине [25]. При полном отсутствии движения рыба способна получать информацию о направлении электромагнитного поля посредством ампулярных органов. Достигается это за счёт пассивной рецепции – сравнения скорости потока морской воды и величины электрического поля, создаваемого этим потоком при его движении в электромагнитном поле Земли [22, 26, 27]. Проведённые экспериментальные работы и теоретическое обоснование выявили ключевую роль электромагнитного поля Земли в ориентации пластиножаберных рыб, обусловленную механизмом восприятия и взаимодействия электромагнитных стимулов.

#### Выявление магнитного компонента у рыб

Проведённые в 1980-х годах успешные эксперименты с **костистыми рыбами** обусловили исследования по выявлению у них рецепторов, реагирующих на электромагнитное поле Земли [28]. Преимущественная численность костистых рыб не имеет рецепторов – ампул Лоренцини, поэтому гипотетический механизм восприятия электромагнитного поля, вероятно, может быть связан совокупностью специфических магнитных металлов, находящихся в рыбе и способствующих ориентированию в геомагнитном поле вопреки тепловой дезорганизации [29]. В природе такими свойствами обладают **кристаллы магнетита**, впервые обнаруженные у моллюсков [Lowenstam, 1962], позднее у насекомых [Gould et al., 1978], бактерий [Frankel et al., 1979] и птиц [Walcott et al., 1979].

**Справочно.** **Магнетит** – встречающийся в природе минерал в форме оксида железа ( $Fe_3O_4$ ), обладающий в отсутствие внешнего электромагнитного поля самопроизвольной намагниченностью, кардинально изменяющейся под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры, относится к ферромагнетикам. Ферромагнетики (Fe, Co, Ni, Gd, Tb, Dy, Ho, Er и др.) являются сильными магнитными веществами: внутренняя напряжённость магнитного поля в них может в сотни раз превосходить внешнее электромагнитное поле. Для железа (Fe) магнитная восприимчивость  $B_s$  составляет 2,18 Тл, величина намагниченности  $J_{so}$  единицы объёма при абсолютном нуле температуры равна 1735,2 Г.

С использованием современной электронной микроскопии были обнаружены кристаллы магнетита у чавычи (*Oncorhynchus tshawytscha*) в хряще этмоида (отдел черепа лососёвых рыб, расположенный рядом с обонятельными нервами-капсулами) [30]. У европейского угря [31a, 31б] и желтоперого тунца [32] магнетит был найден в супраэтноиде (покровная кость черепа, находящаяся над этмоидом).

Обнаруженный в 1988 г. магнетит в тканях этмоида нерки (*Oncorhynchus nerka*), был подробно описан S. Mann с соавторами (1988) [28]. С использованием метода трансмиссионной электронной микроскопии установлено, что кубические или октаэдрические кристаллы однодоменного магнетита размером 25–60 нм расположены в небольших цепочках до 58 элементов (в среднем 21–25). Сопряжение кристаллов в цепочках позволяет суммарному



магнитному моменту взаимодействовать с электромагнитным полем Земли на фоне теплового шума. Количество магнетита в этмоиде лососей, коррелировало с возрастом и размером рыб. На основании полученных данных исследователи констатировали, что магнетит вырабатывается организмом на протяжении всего эмбриогенеза, протекающего в икринках лососей, и онтогенеза, при этом взрослые рыбы обладают более высокой магниточувствительностью по сравнению с молодью. Одинаковые по форме и размерам кристаллы магнетита, их близко сходные величины намагниченности и количественное увеличение в течение жизни свидетельствуют о том, что минерал магнетит является биогенным и синтезируется организмом во многих органах и тканях лососей, а не поступает извне [28]. J. Kirschvink и J. Gould (1981) произвели расчёты, по которым малькам, годовикам и взрослым лососям необходимо иметь, соответственно,  $1 \times 10^4$ ,  $2 \times 10^7$  и  $1 \times 10^8$  частиц магнетита, чтобы взаимодействие суммарного магнитного момента с электромагнитным полем Земли было воспринимаемым организмом рыб [29]. Обнаруженные количества частиц биогенного магнетита в хрящевых тканях этмоида черепа мальков нерки (*Oncorhynchus nerka*), достаточны для определения направления геомагнитного поля, при этом наличие значительного числа кристаллов магнетита на более поздних стадиях жизненного цикла позволяет лососям воспринимать изменения магнитного поля порядка сотен нанотесла, то есть, долей процента от величины индукции электромагнитного поля Земли [33].

В ходе исследований в глазах и коже взрослых лососей – нерки (*Oncorhynchus nerka*), был обнаружен ферромагнитный материал [33]. Аналогичные ферромагнитные минералы в минимальных и следовых количествах были обнаружены при исследовании в коже, глазах, жабрах, мышцах, кишечнике других рыб. Позднее А. Kobayashi et al. (1995) пришли к заключению, что присутствие беспорядочной намагниченности этого материала в глазах и коже рыбы является, скорее всего, следствием ферромагнитного загрязнения [34].

Вероятная ошибочность заключения о ферромагнитном загрязнении тканей и органов рыбы, не согласовывается с данными результатами исследований на магнитные свойства желтоперого тунца [32], представленные в табл. 1, а также других видов рыб (табл. 2).

Таблица 1.

**Магнитные свойства тканей и органов желтоперого тунца [32]**

Ткани и органы	Магнитный момент, пА•м <sup>2</sup>	Намагниченность, пТл
Кишечник	14,5	4,8
Красные мышцы	184,0	3,5
Белые мышцы	155,0	5,7
Мозг	36,4	7,5
Жабра	95,0	20,6
Кожа	41,7	35,7
Лобная кость	202,0	103,6
Грудной плавник	325,0	62,5
Спинной плавник	400,0	–
Сердечная мышца	500,0	4,5
Глаз	1242,5	13,7
Решётчато-обонятельная кость	1320,6	127,0





Таблица 2.

**Магнитный момент некоторых тканей и органов различных рыб [34].**

Вид рыбы	Магнитный момент, пА • м <sup>2</sup>		
	Решётчато-обонятельная кость	Мышцы	Глаз
<i>Thunnus albacares</i> (тунец желтоперый)	260-3000	20-50	100-2600
<i>T. alalunga</i> (тунец длинноперый)	100-200	30	1700
<i>T. obesus</i> (тунец большеглазый)	480	400	-
<i>Sarda orientalis</i> (тунец полосатый)	1500	700-1200	5000
<i>Scomber sp.</i> (скумбрия)	1750	60	90
<i>Makaira nigricans</i> (марлин голубой)	110-170	-	-
<i>Oncorhynchus tschawytscha</i> (чавыча)	310-360	50-73	100-2300
<i>Engraulis mordax</i> (анчоус северный)	235-2850	40-170	-

Все рыбы, относящиеся к отрядам Perciformes (сем. Scombridae, Istiophoridae, Coryphaenidae), Clupeiformes (сем. Engraulidae) и Salmoniformes (сем. Salmonidae), имели магнитный материал, связанный с решетчатой костью или передней частью черепа (табл. 2). У восьми видов пелагических рыб величина магнитного момента в решетчатой кости черепа варьировала в пределах от 100 до 3000 пА·м<sup>2</sup>. Эти значения в основном находились в пределах 100-1000 пА·м<sup>2</sup> и наиболее устойчивыми были у желтоперого тунца (*Thunnus albacares*), тунца полосатого (*Sarda orientalis*), голубого марлина (*Makaira nigricans*) и чавычи (*Oncorhynchus tschawytscha*).

**Система восприятия электромагнитных полей у рыб**

На примере радужной форели (*O. mykiss*) M. Walker et al. (1997) определили, какие элементы нервной системы рыб, обладающих биогенным магнетитом, задействованы в восприятии электромагнитного поля [35]. В ходе экспериментов с форелью были записаны изменения потенциала отдельных нервных волокон глазной ветви тройничного нерва при трёх режимах мгновенного изменения магнитного поля (сигнал квадратной формы) с частотами 0,5 и 1 Гц: 1) геомагнитное поле – инвертированное геомагнитное поле; 2) геомагнитное поле – утроенное геомагнитное поле; 3) инвертированное геомагнитное поле – утроенное геомагнитное поле. На зафиксированный ответ нервной системы форели на утроение интенсивности магнитного поля, отклика на его инверсию не зафиксировано. Однако у мальков лосося была обнаружена реакция на изменение направления при отсутствии поведенческого ответа на инверсию вектора геомагнитного поля [36].

При идентификации магниторецепторов у форели с использованием конфокальной лазерной сканирующей микроскопии были обнаружены в особых клетках цепочки магнетита [35]. Скопления этих клеток располагались рядом с базальным слоем обонятельного эпителия, вдали от обонятельных рецепторов. Клетки размером около 10–12 мкм имели трёхдольчатую форму и содержали кристаллы магнетита такой же формы и размеров, какие ранее обнаружены в этмоиде черепа нерки. Клетки-рецепторы геомагнитного поля у форели были



описаны позднее этими же исследователями более детально [37]. На заключительном этапе работы были определены локализации окончаний нервных путей, зафиксированные ответами на электромагнитные стимулы. Глазная ветвь тройничного нерва, регистрирующая электромагнитные стимулы, соединяясь с другими ветвями тройничного нерва, связана с продолговатым мозгом. Другая же часть нервных окончаний глазной ветви тройничного нерва соединяется с обонятельной капсулой, расположенной в местах скопления магниточувствительных клеток.

От продолговатого мозга лосося отходит большинство головных пучков нервов (*тройничный, отводящий, лицевой, слуховой, языкоглоточный и блуждающий нерв*), иннервирующих органы дыхания, слуха и равновесия, осязания, сердце, пищеварительную систему и имеющего много ветвей блуждающий нерв, через электромагнитные стимулирующие органы чувств и системы боковой линии.

Электромагнитная афферентация, как и любая сенсорная информация, поступает в промежуточный мозг. Промежуточный мозг является центром переключений возбуждений, поступающих из всех отделов мозга, связанных с ним, и через гормональную деятельность (*эпифиз, гипофиз и таламус*) участвует в регуляции метаболизма организма рыб. Электромагнитная сенсорика имеет прямое отношение к эпифизу млекопитающих и рыб. У почтовых голубей, морских свинок и крыс в искусственном электромагнитном поле фиксировали повышение электрической активности. У крыс созданное электромагнитное излучение изменяло секреторную активность эпифиза [38]. В ночное время 15-ти минутная электромагнитная экспозиция повышала активность фермента ацетилтрансферазы и образование гормона мелатонина в эпифизе. При воздействии на крыс электромагнитных излучений на частоте 915 МГц и плотности потока мощности 97,8 мкВт/см<sup>2</sup> со средним интегральным значением 22 мкВт/см<sup>2</sup> происходят необратимые специфические морфологические изменения ультраструктуры ткани эпифиза [39]. С использованием трансмиссионной электронной микроскопии определено накопление в тканях гранул липофусцина и электронно-плотного «мозгового песка», а также исчезновение ядрышек и вакуолизация цитоплазмы в эпифизе экспериментальных групп животных, являющихся главными морфологическими признаками старения и функционального истощения как светлых, так и тёмных пинеалцитов эпифиза. То есть, эпифиз и таламус биологических организмов и рыб воспринимает информацию об изменении индукции электромагнитного поля по нервной и гуморальной системе.

В 2008 году М. Walker показал механизм основоопределяющего элемента магниторецепторной системы – передачу информации магниточувствительных клеток и трансформацию изменений электромагнитного поля в нервный импульс [40]. Цепи кристаллов магнетита длиной около 1 мкм в каждой клетке крайне чувствительны к электромагнитному полю и обуславливают передачу информации об изменении геомагнитного поля рецепторным клеткам. Расположение магнетитных цепочек в клетках позволяет предположить, что в основе преобразования информации об электромагнитных условиях в изменении мембранного потенциала клетки лежит трансформация механического момента цепочки магнетитов относительно мембраны в ответ на действие электромагнитного поля. Одним концом магнетитная цепочка прикреплена к клеточной мембране и связана филаментами с несколькими физиологически открываемыми ионными каналами, сконцентрированными вокруг цепочки. Филаменты ограничивают тепловое движение цепочки, которая может двигаться только в пределах конуса, направленного перпендикулярно мембране. Внутри конуса характер движения цепочки зависит от внешнего электромагнитного поля. Движение цепочки в сторону от оси конуса растягивает филаменты и открывает ионные каналы на другой стороне. При приближении магнетитной цепочки к оси конуса, натяжение филаментов



ослабевают и каналы закрываются. В конкретный момент времени состояние ионных каналов формирует потенциал на мембране клетки. Все рецепторные клетки воспринимают направление внешнего электромагнитного поля относительно оси движения цепочки магнетитов. На основе совокупности сигналов, поступающих от каждой рецепторной клетки, формируется информация о векторе электромагнитного поля. В других таксономических группах позвоночных, у организмов, обладающих электромагниточувствительностью, обнаружены анатомически сходные и аналогично иннервируемые структуры [41, 42]. На примере рыб впервые была описана система электромагниточувствительности, основанная на использовании биогенного магнетита.

### ОРИЕНТАЦИЯ РЫБ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Ориентация костистых рыб в электромагнитном поле Земли была показана в экспериментах с неркой (*O. nerka*) [43]. Весной мальки нерки мигрируют из речных местообитаний с галечным дном в озера. Quinn T.P. (1980) во время миграции помещал мальков нерки в специальные резервуары с коридорами, радиально расходящимися от центра, и наблюдал за предпочитаемым направлением их движения днём и ночью, а также в условиях, когда обзор неба был закрыт [43]. Во всех резервуарах днём и ночью мальки нерки чаще выбирали коридор, направленный к озеру. После поворота против часовой стрелки горизонтальной компоненты геомагнитного поля на 90° предпочитаемое направление движения мальков нерки также изменилось на 90° против часовой стрелки. Этот эффект наблюдался ночью, даже если рыбы видели небо, а днём – только в тех резервуарах, где обзор неба был закрыт. Когда мальки нерки видели Солнце, они сохраняли направление к озеру и в условиях изменённого направления горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Таким образом, для определения географического направления рыбы использовали и положение Солнца на небе, и электромагнитное поле Земли. Позднее Quinn T.P. и Brannon E.L. (1982) повторили эти эксперименты с годовиками нерки и получил сходные результаты [44].

Животные многих видов и рыбы во время периодов неподвижности занимают определённое положение относительно электромагнитного поля Земли, чаще всего ориентировочно головой на север. Однако это положение все же асимметрично относительно магнитного поля: у разных биологических видов отклонение от севера к востоку составляет в среднем от нескольких градусов до сорока [45]. Подобная тенденция обнаружена и у карпа (*Cyprinus carpio*): ориентация рыб в ёмкости с водой отклоняется от направления на север в среднем на 8 градусов к востоку [46]. Эта закономерность даёт основания предполагать, что реакция на геомагнитное поле латерализована, так же как и реакции на многие другие ориентиры во внешней среде. У рыб латерализация поведения проявляется, например, в предпочтении поворачивать вправо (или наоборот, влево) при свободном выборе направления поворота; в выборе одного из двух пищевых объектов, симметрично расположенных в поле зрения рыбы; в предпочтении обходить препятствие с определённой стороны и т.д. Полагают, что латерализация поведения рыб вызвана функциональной асимметрией нервной системы, но, вероятно, может быть и следствием асимметрии органов чувств [47]. Соответственно, латерализация ориентации рыбы в электромагнитном поле Земли может отражать как асимметричное расположение рецепторов поля (например, кристаллов магнетита), так и асимметрию центральных отделов нервной системы, ответственных за обработку сигналов, поступающих от рецепторов [45].

При исследовании магниточувствительности (способности ощущать магнитное поле) пластиножаберных рыб проводили наблюдения за их перемещением в море. Изучение передвижений синих акул (*Prionace glauca*) методами акустической телеметрии показало, что при отсутствии ориентиров в толще морской воды акулы могут поддерживать выбранное направление движения в течение нескольких дней [48]. На основании сопоставления



траектории движения акул и электромагнитной карты морской акватории исследователи констатируют, что они ориентировались по вектору электромагнитного поля Земли и не реагировали на небольшие локальные магнитные аномалии.

Klimley A.P. с соавторами [49] на основе анализа передвижений акулы-молота (*Sphyrna lewini*) предположили, что акулы могут использовать для навигации и локальные магнитные поля. Позднее Klimley A.P. в течение ряда лет наблюдал за хомингом нескольких особей акулы-молота, к телу которых были прикреплены ультразвуковые передатчики [50]. Отслеживание траекторий движения акул в море сопровождалось детальными измерениями величины магнитной индукции на различных глубинах в районе проведения исследований. После анализа полученных результатов, исследователь пришёл к заключению, что для ориентации в пространстве акулы использовали локальные электромагнитные поля, т.е. суперпозицию электромагнитного поля Земли и полей, создаваемых намагниченными породами, образующими в море подводный рельеф. При этом градиент геомагнитного поля на глубине 175 м, где отслеживалась траектория движения акулы, составлял всего 0,037 нТл/м [50]. Характерно, что градиент электромагнитного поля Земли увеличивается с глубиной морских акваторий [50, 51]. Это может быть дополнительным фактором, позволяющим рыбам использовать восприятие электромагнитного поля Земли для ориентации на больших морских глубинах. Дальнейшие исследования Klimley A.P. при изучении траекторий движения трёх видов акул (*Isurus oxyrinchus*, *Carcharodon carcharias*, *P.Glauca*), также свидетельствуют о возможном использовании рыбами электромагнитного поля Земли для ориентации в морском и океаническом пространствах [52]. На основании анализа траектории движения скатов (*Myliobatis californica*) было сделано предположение о восприятии ими электромагнитного поля Земли [53].

В 2000-х годах были проведены ряд исследований навигационных способностей тунцов, обитающих в тропических и субтропических водах Атлантического, Тихого и Индийского океана. Тунцы, насчитывающие 15 видов, одни из самых быстрых рыб в море. Так, желтопёрый тунец способен развивать в воде скорость до 75 км/час. Тунцы для нереста (плодовитость до 10 млн икринок) и нагула пересекают Тихий и Атлантический океаны, используя для навигации, как предполагают, электромагнитное поле Земли [54].

Willis J. с соавторами (2009) исследовали пиковые погружения молоди 21 южного голубого тунца (*Thunnus maccoyii*), которым имплантировали архивные метки в Большом Австралийском заливе [55]. Установлено, что профили пиковых погружений зеркально схожи у всех тунцов, участвовавших в исследовании. На рассвете и закате в морских акваториях тунцы, учитывая электромагнитные показатели среды обитания, совершают резкие спуски на глубину до 600 м и подъёмы, называемые «пиковыми погружениями». Тунцы быстро опускаются под крутым углом в глубину моря, а затем возвращаются на поверхность. Погружения тунцов происходят приблизительно за полчаса до восхода и захода, когда Солнце находится в градусах шести над горизонтом. Исследователи представили анатомические доказательства развития специфической шишковидной железы у тунцов, рептилий, земноводных, посредством которой определяется направление солнечного света, поляризация света от неба и, очевидно, силовые линии электромагнитного поля Земли.

Помимо шишковидной железы тунцы, как и другие виды рыб, для определения напряжённости электромагнитного поля Земли используют кристаллы магнетита, находящиеся в клетках супраэктоида, расположенных рядом с обонятельными нервами-капсулами [56].

Гипотетически утверждается, что тунцы в поверхностных морских водах производят съёмку поляризационных координат в сумеречном небе для определения показателей электромагнитного поля Земли и направления дальнейшей миграции. А на глубинных этапах





«пиковых погружений» они, очевидно, фиксируют индукцию электромагнитного поля Земли на океанском дне с более высокой точностью, по сравнению с показателями в верхних слоях морской поверхности [7, 55].

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭМПЗ И ХОМИНГА ЛОСОСЯМИ ДЛЯ МИГРАЦИИ НА НАГУЛ В ОКЕАН И НА НЕРЕСТ В «РОДОВЫЕ» МЕСТА РЕК**

Ионосфера Земли постоянно находится под влиянием солнечных и лунных приливных сил, поэтому электромагнитное поле Земли проявляет малоамплитудные изменения с периодами, равными солнечным и лунным суткам, синодическому месяцу и тропическому году. Точность этих колебаний электромагнитной сферы Земли чрезвычайно высока. Колебания электромагнитного поля планеты могут служить синхронизатором биологических часов, давая возможность всем чувствительным биологическим организмам, включая рыб, постоянно отслеживать течение времени.

С помощью условных рефлексов экспериментально доказано, что пластинчатожаберные и костистые рыбы (лососёвые, угреобразные), реагируют на изменение электромагнитного поля Земли и изменяют свою пространственную ориентацию в электромагнитных полях искусственного происхождения. В природе известно несколько типов вариаций электромагнитного поля. Во-первых, это суточные изменения, обусловленные прохождением солнечных ветров через ионосферу и электромагнитную сферу Земли. Во-вторых, это короткопериодные электромагнитные флуктуации собственного электромагнитного поля Земли, обладающие суточной периодичностью. В-третьих, это магнитные бури, эпизодически возникающие вследствие взаимодействия электромагнитной сферы Земли с эфирными гравитационными энергетическими потоками, излучаемых Солнцем (вспышки на Солнце) [38].

Все три типа электромагнитных возмущений приводят к образованию в земной коре и морской воде теллурических токов. Градиент потенциала теллурических токов имеет суточные колебания в 0,01-0,1 мкВ/см. Во время электромагнитных бурь флуктуации теллурических токов многократно возрастают, достигая 0,1-100 кВ/см. Градиент теллурических токов существенно выше вблизи берега и вдоль континентального шельфа, что обуславливает привязанность миграционных маршрутов многих птиц и рыб к береговой линии или шельфу.

Теллурические токи, являющиеся пороговыми раздражителями для рыб, используются мигрирующими рыбами для привязки к определённому маршруту [38]. Экспериментально установлено изменение электрической активности ампул Лоренцини акул при флуктуации теллурических токов. Для других таксономических групп биологических организмов убедительно доказано, что электромагнитное поле Земли является фактором внешней среды, используемое ими для ориентации в пространстве при миграции в родные «родовые» места для воспроизводства потомства.

### **Физиологические биотелеметрические исследования миграции лососей**

Многочисленные популяции природных тихоокеанских лососей, обладающие генетически врождённой способностью, достаточно быстро и точно совершают тысячекilометровые миграции от побережья Камчатки, Сахалина и Курильских островов, Хабаровского и Приморского края, Северной Америки, Японских островов в океанские просторы Северной Пацифики и обратно в родные реки и водоёмы к месту своего рождения для размножения. Репродуктивная миграция – многолетняя проблемная загадка жизненного цикла лососей, наиболее сложная в её изучении. В настоящее время считается, что некоторые специфические факторы внутриутробного развития отражаются на нервной системе молоди лососей вовремя импринтинговой миграции вниз по течению в море, и взрослые особи лососей используют эти факторы для распознавания своего родного речного потока во время навигационной миграции вверх по течению [57].



В 1950-х годах исследовательская группа Хаслера выдвинула обонятельную гипотезу об импринтинге лосося и его возвращении к родному ручью [58] и постулировала, что эта способность к обонянию проявляется на небольшом расстоянии от берега их родного ручья. Однако тихоокеанские лососи не могут использовать эту способность к обонянию при миграции на большие расстояния от места нагула в океане к родовым водным «гнездам».

В 1980-2000-х годах многими учёными из разных стран проведены глубокие эндокринологические исследования (изучение гормональных механизмов) импринтинга и навигационной миграции тихоокеанских лососей, а также нейрофизиологические и биохимические исследования обонятельного импринтинга и способности лососей к хомингу. Однако многие задачи на сегодня не решены, такие как сенсорные механизмы ориентации в открытой морской воде, механизмы гормонального контроля сенсорных систем и центральной нервной системы, точное и ложное наведение на цель, а также сезонные и ежегодные изменения в составе DFAA (растворённых свободных аминокислот), неорганических катионов и желчных кислот, биоплёнок в водах родовых ручьёв лососей [59, 60, 61].

С развитие новых методов биотелеметрии, таких как ультразвуковая и радиотелеметрия, регистрация данных и спутниковая телеметрия со всплывающих окон, появилась возможность непрерывного наблюдения за поведением лососей под водой в океане и открытых водоёмах, поскольку раньше невозможно было это контролировать с использованием несовершенных методов [62, 63].

Японскими исследователями Tanaka et al. (2005), в июне 2000 года в центральной части Берингова моря (56°30' с.ш., 179°00' в.д.) была выловлена небольшая партия взрослой кеты ярусным способом в здоровом состоянии и, по оценкам учёных, японского происхождения, поскольку большинство видов молоди японской кеты выращивались в рыбоводных заводах, и ширина чешуйчатого кольца на стадии малька у них была больше, чем у природного лосося из морских акваторий других стран. Регистратор данных пропеллера, который регистрировал скорость плавания (*отбор проб в течение 5 секунд*), глубину (*отбор проб в течение 5 секунд*) и температуру (*отбор проб в течение 1 минуты*), был прикреплен снаружи к дорсальной мускулатуре рыбы, находящейся впереди дорсальной кости [64].

С помощью этих регистраторов данных исследователи выпустили в океан 27 особей кеты, а в сентябре 2000 года извлекли из них одну кету из сети на восточном побережье японского острова Хоккайдо (43°20' с.ш., 145°46' в.д.). Был получен первый отчёт о плавательных характеристиках самонаводящейся кеты в океанической фазе, содержащий данные за 67 дней плавания на расстоянии 2750 км по прямой и показывающий, что средняя скорость плавания, глубина и температура составляли  $62 \pm 12$  см/с–1,  $10,4 \pm 14,7$  м и  $9,2 \pm 0,2$  °C, соответственно. Скорость плавания и глубина имели два максимума во время восхода и захода Солнца с ещё одним небольшим пиком около полуночи. Кета демонстрировала последовательное движение вверх и вниз вблизи термоклина в сумерках и днём. Эти суточные закономерности свидетельствуют о том, что самцы кеты выделяют время на поиск пищи и что их стратегии миграции различаются в зависимости от дня и ночи [64].

Полученные результаты указывают на то, что кета обладает хомингом – способностью ориентироваться в направлении своего дома (родной реки), а перемещение с помощью водных течений может способствовать её успешной миграции. Во время миграции лосось распознаёт своё точное географическое местоположение (*координаты*) и направление по компасу (*ориентация*), а также имеет врождённые «биологические часы» для точного определения местоположения в открытой морской воде.

В работе Lewis C. Naisbett-Jones, Kenneth J. Lohmann (2022) показано, что способность получать информацию о местоположении с помощью электромагнитного поля Земли широко распространена среди представителей семейства лососёвых [65]. Исследование, проведённое



на горбуше (*O. gorbuscha*) во время океанических миграций, показало возможность использования информации о местоположении по векторным компонентам электромагнитного поля Земли. Молодых особей горбуши, никогда не мигрировавших, протестировали в двух магнитных полях, существующих в местах, где ориентация, которую принимают рыбы, может указывать на то, возвращаются ли они домой, ориентируются ли на центр своего ареала или следуют по своему миграционному маршруту. В обоих случаях наблюдаемая ориентация рыб соответствовала направлению, которое они должны были бы выбрать, если бы следовали по своему миграционному маршруту. Полученные результаты свидетельствуют о том, что магнитные карты у молодых лососей, по-видимому, точно настроены на миграционные маршруты отдельных популяций рыбы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электромагнитное поле Земли представляет собой чрезвычайно надёжный и всеобъемлющий источник информации. Оно постоянно присутствует и проявляется во всех точках планеты, от глубин океана до верхних слоёв атмосферы. Электромагнитное поле Земли присутствует во всей пресноводной и морской среде и является самым распространённым источником информации для рыб и различных водных животных, в том числе для моллюсков, ракообразных, морских черепах и многих гидробионтов, что и обусловило развитие их способностей ориентироваться по градиентам общей напряжённости электромагнитного поля и угла наклона.

С использованием современной электронной микроскопии были обнаружены кристаллы магнетита у чавычи (*Oncorhynchus tshawytscha*) в хряще этмоида (отдел черепа лососёвых рыб). В 1988 г. был обнаружен магнетит в тканях этмоида нерки (*Oncorhynchus nerka*). В 2008 году М. Walker показал механизм основоопределяющего элемента магниторецепторной системы – передачу информации магниточувствительных клеток и трансформацию изменений электромагнитного поля в нервный импульс лосося. На примере рыб впервые была описана система электромагниточувствительности, основанная на использовании биогенного магнетита. Установлено, что эпифиз и таламус биологических организмов и рыб воспринимает информацию об изменении индукции электромагнитного поля Земли по нервной и гуморальной системе.

Экспериментально доказано, что пластинчатожаберные и костистые рыбы (лососёвые, угреобразные), реагируют на изменение электромагнитного поля Земли и изменяют свою пространственную ориентацию в электромагнитных полях искусственного происхождения. Для многих групп биологических организмов убедительно доказано, что электромагнитное поле Земли является фактором внешней среды, используемое ими для ориентации в пространстве при миграции в речные «родовые» места для воспроизводства потомства.

Выявлено взаимодействие электромагнитного поля Земли и биогенного хоминга, обуславливающих географически векторно-точную ориентацию миграции популяций тихоокеанских лососей рода *Oncorhynchus* на нагул в Тихий океан и на нерест в многолетние речные «родовые гнезда» для воспроизводства здорового потомства.

### Список литературы:

1. Вернадский В.И. Живое вещество. – М.: Наука, 1978. – 358 с.
2. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. – 2-е изд. – М.: Мысль, 1976. – 367 с.
3. Григорьев В.И., Мякишев Г.А. Силы в природе. – 6-е изд. испр. – М.: Наука, 1983. – 414 с.
4. Пресман А.С. Организация биосферы и её космические связи. – М.: Гео-СИНТЕГ, 1997, 240 с.
5. Fleissner G., Fleissner G. Magnetoreception // Encyclopedia of animal behavior. Oxford: Elsevier-Academic Press. 2010. P. 324–335.



6. Новиков С. Электромагнетизм и электричество Земли // <https://maymed.ru/?p=657>. (Дата обращения 20.02.2024).
7. Смирнов В.Б. Физика твёрдой Земли – 2023 // <http://ocean.phys.msu.ru/geo/> (Дата обращения 24.04.2024).
8. Skiles D.D. The geomagnetic field: its nature, history and biological relevance // *Magnetite biomineralization and magnetoreception by living organisms: a new biomagnetism*. N. Y.: Plenum Press. 1985. P. 43–102.
9. Chulliat, A.; Brown, W.; Alken, P.; Beggan, C.; Nair, M.; Cox, G.; Woods, A.; Macmillan, S.; Meyer, B.; Panizza, M. (2020). The US/UK World Magnetic Model for 2020–2025 // <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/24390> (Дата обращения 22.02.2024).
10. "Ocean Tides and Magnetic Fields". *NASA. Scientific Visualization Studio. 2016-12-30*. This article incorporates text from this source, which is in the public domain. (Дата обращения 15.02.2024).
11. Магнитное поле океанов / 100 великих тайн океанов // <https://ours-nature.ru/lib/b/book/1346893781/32>. (Дата обращения 15.02.2024).
12. Akasofu S.I., Chapman S. *Solar-terrestrial physics*. Oxford: Clarendon Press. 1972. 901 p.
13. Chapman S., Bartels J. *Geomagnetism*. London: Oxford University Press. 1940. 217 p.
14. Leitgeb N., Cech R., Schrottner J., Lehofer P., Schmidpeter U., Rampetsreiter M. Magnetic emissions of electric appliances // *Int. J. Hyg. Environ. Health*. 2008. Vol. 211. P. 69–73.
15. Lagroye I., Percherancier Y., Juutilainen J., De Gannes F.P., Veyret B. ELF magnetic fields: animal studies, mechanisms of action // *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 2011. Vol. 107, № 3. P. 369–373.
16. Lorenzini, Stefano (1678). *Osservazioni intorno alle torpedini*. Флоренция, Италия: *Perl'Onofri*. doi:10.5962/bhl.title.6883. OCLC 2900213.
17. Мюррей, Р.У. (сентябрь 1960). "Электрическая чувствительность ампул Лоренцини". *Природа*. 187 (4741): 957. Bibcode:1960 NATUR.187..957M. doi:10.1038/187957a0. PMID 13727039.
18. Murray R.W. Electrical sensitivity of the ampullae of Lorenzini // *Nature*. 1960. Vol. 187. P. 957.
19. Dijkgraaf S., Kalmijn A.J. Verhaltensversuche zur funktion der Lorenzinischen ampullen // *Naturwissenschaften*. 1962. Vol. 49, № 17. P. 400.
20. Albert J.S., Crampton W.G.R. Electroreception and electrogenesis // *The physiology of fishes*. Boca Raton: CRC Press. 2006. P. 429–470.
21. Hofmann M.H. Physiology of ampullary electrosensory systems // *Encyclopedia of fish physiology from genome to environment*. San Diego: Acad. Press. 2011. P. 359–365.
22. Kalmijn A.J. Theory of electromagnetic orientation: a further analysis // *Comparative physiology of sensory systems*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1984. P. 525–560.
23. Andrianov G.N., Brown H.R., Ilyinsky O.B. Responses of central neurons to electrical and magnetic stimuli of the ampullae of Lorenzini in the Black Sea skate // *J. Comp. Physiol. A*. 1974. Vol. 93, № 4. P. 287–299.
24. Brown H.R., Ilyinsky O.B. The ampullae of Lorenzini in the magnetic field // *J. Comp. Physiol. A*. 1978. Vol. 126, № 4. P. 333–341.
25. Northcutt R.G. Brain organization in the cartilaginous fishes // *Sensory biology of sharks, skates, and rays*. Washington: Government printing office. 1978. P. 107–193.
26. Paulin M.G. Electroreception and the compass sense of sharks // *J. Theor. Biol.* 1995. Vol. 174. P. 325–339.
27. Tricas T.C. The neuroecology of the elasmobranch electrosensory world: why peripheral morphology shapes behavior // *Environ. Biol. Fish.* 2001. Vol. 60. P. 77–92.





28. Mann S., Sparks N.H., Walker M.M., Kirschvink J.L. Ultrastructure morphology and organization of biogenic magnetite from sockeye salmon, *Onchorhynchus nerka*: implications for magnetoreception // *J. Exp. Biol.* 1988. Vol. 140. P. 35–49.
29. Kirschvink J.L., Gould J.L. Biogenic magnetite as a basis for magnetic field detection in animals // *Biosystems.* 1981. Vol. 13. P. 181–201.
30. Kirschvink J.L., Walker M.M., Chang S.B., Dizon A.E., Peterson K.A. Chains of single-domain magnetite particles in chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha* // *J. Comp. Physiol. A.* 1985. Vol. 157. P. 375–381.
- 31a. Hanson M., Karlsson L., Westerberg H. Magnetic material in European eel (*Anguilla anguilla* L.) // *Comp. Biochem. Physiol. A.* 1984. Vol. 77. P. 221–224.
- 31b. Hanson M., Wirmark G., Oblad M., Strid L. Iron-rich particles in European eel (*Anguilla anguilla* L.) // *Comp. Biochem. Physiol. A.* 1984. Vol. 79. P. 311–316.
32. Walker M.M., Kirschvink J.L., Chang S.B., Dizon A.E. A candidate magnetic sense organ in the yellowfin tuna, *Thunnus albacores* // *Science.* 1984. Vol. 224. P. 751–753.
33. Walker M.M., Quinn T.P., Kirschvink J.L., Groot C. Production of single-domain magnetite throughout life by sockeye salmon, *Onchorhynchus nerka* // *J. Exp. Biol.* 1988. Vol. 140. P. 51–63.
34. Kobayashi A.K., Kirschvink J.L., Nesson M.H. Ferromagnetism and EMFs // *Nature.* 1995. Vol. 374. P. 123.
35. Walker M.M., Diebel C.E., Haugh C.V., Pankhurst P.M., Montgomery J.C., Green C.R. Structure and function of the vertebrate magnetic sense // *Nature.* 1997. Vol. 390. P. 371–376.
36. Quinn T.P., Merrill R.T., Brannon E.L. Magnetic field detection in sockeye salmon // *J. Exp. Zool.* 1981. Vol. 217. P. 137–142.
37. Diebel C.E., Proksch R., Green C.R., Neilson P., Walker M.M. Magnetite defines a magnetoreceptor // *Nature.* 2000. Vol. 406. P. 299–302.
38. Иванов А.А. Физиология рыб. – М.: Мир. 2003. 284 с.
39. Яценко С.Г., Рыбалко С.Ю. Морфологическая структура эпифиза крыс при воздействии электромагнитных излучений коммуникационных устройств // *Гигиена и санитария.* 2016. № 95 (10). С. 977-979. DOI: <http://10.18821/0016-9900-2016-95-10-977-979>.
40. Walker M.M. A model for encoding of magnetic field intensity by magnetite-based magnetoreceptor cells // *J. Theor. Biol.* 2008. Vol. 250. P. 85–91.
41. Beason R., Semm P. Does the avian ophthalmic nerve carry magnetic navigational information? // *J. Exp. Biol.* 1996. Vol. 199. P. 1241–1244.
42. Kirschvink J.L., Walker M.M., Diebel C.E. Magnetite-based magnetoreception // *Curr. Opin. Neurobiol.* 2001. Vol. 11, № 4. P. 462–467.
43. Quinn T.P. Evidence for celestial and magnetic compass orientation in lake migrating sockeye salmon fry // *J. Comp. Physiol. A.* 1980. Vol. 137. P. 243–248.
44. Quinn T.P., Brannon E.L. The use of celestial and magnetic cues by orienting sockeye salmon smolts // *J. Comp. Physiol. A.* 1982. Vol. 147. P. 547–552.
45. Malkemper E. P., Painter M. S., Landler L. Shifted magnetic alignment in vertebrates: Evidence for neural lateralization? // *Journal of Theoretical Biology.* 2016. Vol. 399. P. 141–147.
46. Hart V., Kusta T., Nemeč P., Blahova V., Jezek M., Novakova P., Begall S., Cerveny J., Hanzal V., Malkemper E.P., Stipek K., Vole C., Burda H. Magnetic alignment in carps: evidence from the Czech christmas fish market // *PLoS One.* 2012. Vol. 7. e51100.
47. Nepomnyashchikh V. A., Izvekov E. I. Variability of the behavioral laterality in Teleostei (Pisces) // *J. Ichthyol.* 2006. Vol. 46. Suppl. 2. P. S235–S242. DOI: 10.1134/s0032945206110142
48. Carey E.G., Scharold J. Vol. Movements of blue sharks (*Prionace glauca*) in depth and course // *Mar. Biol.* 1990. Vol. 106. P. 329–342.



49. Klimley A.P., Butler S.B., Nelson D.R., Stull A.T. Diel movement of scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini* Griffith and Smith, to and from a seamouth in the Gulf of California // *J. Fish. Biol.* 1988. Vol. 33. P. 751–761.
50. Klimley A.P. Highly directional swimming by scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini*, and subsurface irradiance, temperature, bathymetry, and geomagnetic field // *Mar. Biol.* 1993. Vol. 117. P. 1–22.
51. Macdonald K.C., Miller S.P., Huestis S.P., Spiess E.N. Three-dimensional modeling of a magnetic reversal boundary from inversion of deep-tow measurements // *J. Geophys. Res.* 1980. Vol. 85. P. 3670–3680.
52. Klimley A.P., Beavers S.C., Curtis T.H., Jorgensen S.J. Movements and swimming behavior of three species of sharks in La Jolla Canyon, California // *Environ. Biol. Fish.* 2002. Vol. 63. P. 117–135.
53. Klimley A.P., Kihlsinger R.L., Kelly J.T. Directional and non-directional movements of bat rays, *Myliobatis californica*, in Tomales Bay, California // *Environ. Biol. Fish.* 2005. Vol. 74. P. 79–88.
54. Tawa A., Ishihara T., Uematsu Y., Ono T., & Ohshimo S. Evidence of westward transoceanic migration of Pacific bluefin tuna in the Sea of Japan based on stable isotope analysis// *Marine Biology.* 2017. Vol. 164 (4). P. 94.
55. Willis J., Phillips J., Muheim R., Diego-Rasilla F. J., & Hobday A. J. Spike dives of juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*): a navigational role? // *Behavioral Ecology and Sociobiology.* 2009. Vol. 64 (1). P. 57–68.
56. Walker M. M. Learned magnetic field discrimination in yellowfin tuna, *Thunnus albacares*// *J. Comp. Physiology A.* 1984. Vol. 155 (5). P. 673–679.
57. Ueda, H. 2012. Physiological mechanisms of imprinting and homing migration in Pacific salmon *Oncorhynchus* spp. *J. Fish Biol.* 81: 543–558.
58. Hasler, A.D. and A.T. Scholz. 1983. Olfactory imprinting and homing in salmon. Springer-Verlag, New York. USA.
59. Costerton, J.W., Z. Lewandowski, D. DeBeer, D. Caldwell, D. Korber, and G. James. 1994. Biofilms, the customized microniche. *J. Bacteriol.* 176: 2137–2142.
60. Shoji, T., H. Ueda, T. Ohgami, T. Sakamoto, Y. Katsuragi, K Yamauchi, and K. Kurihara. 2000. Amino acids dissolved in stream water as possible homestream odorants for masu salmon. *Chem. Sen.* 25: 533–540.
61. Nosyk, O., E.T. Haseborg, U. Metzger, and F.H. Frimmel. 2008. A standardized pre-treatment method of biofilms for fluorescence microscopic characterization. *J. Microbiol. Meth.* 75: 449–456.
62. Cooke, S.J., S.G. Hinch, M. Wikelski, R.D. Andrews, L.J. Kuchel, T.G. Wolcott, and P.J. Butler. 2004. Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology. *Trends Ecol. Evol.* 19: 334–343.
63. Ueda, H. 2004. Recent biotelemetry research on lacustrine salmon homing migration. *Mem. Nat. Inst. Polar Res. Spec. Issue.* 58: 80–88.
64. Tanaka, H., Y. Naito, N.D. Davis, S. Urawa, H. Ueda, and M. Fukuwaka. 2005. Behavioral thermoregulation of chum salmon during homing migration in coastal waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 291: 307–312.
65. Lewis C. Naisbett-Jones, Kenneth J. Lohmann. 2022. Magnetoreception and magnetic navigation in fishes: a half century of discovery // *J. Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol.* Jan; 208 (1). P.19–40. doi: 10.1007/s00359-021-01527-w.

