



СИНХРОНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ В ОРГАНИЗАЦИИ СОЦИАЛЬНОЙ ЖИЗНИ МИКРООРГАНИЗМОВ

ГРЕЧЕНКО Т.Н.

*Институт психологии Российской академии наук (ФГБОУ ИП РАН),
г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7361-4714>, e-mail: grecht@mail.ru*

ХАРИТОНОВ А.Н.

*Институт психологии Российской академии наук (ФГБОУ ИП РАН);
Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ),
г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4801-9937>, e-mail: ankhome47@list.ru*

ЖЕГАЛЛО А.В.

*Институт психологии Российской академии наук (ФГБОУ ИП РАН);
Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ),
г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5307-0083>, e-mail: zhegs@mail.ru*

СУМИНА Е.Л.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
(ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова»), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8848-2379>, e-mail: stromatolit@list.ru*

СУМИН Д.Л.

*Сетевое исследовательское сообщество САНИПЭБ, г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4455-0819>, e-mail: stromatolit@list.ru*

Многие микроорганизмы образуют сообщества, члены которых координируют свои действия при решении общих задач. Одной из форм таких сообществ являются биопленки. В опытах по восстановлению целостности биопленки получены данные о состоянии осцилляторов в относительно спокойных и в активных локусах пленки, формируемой цианобактериями *Oscillatoria terebriformis*. Для изучения взаимодействия между различными частями биопленки регистрировались полевые потенциалы одновременно из двух локусов. Наличие функциональной связи между разными зонами биопленки выявлялось при помощи коэффициентов кросскорреляции. Уровень синхронизации полевых потенциалов между областями определялся при помощи коэффициентов частотной и частотно-временной когерентности. Локусы повышенной и пониженной активности характеризуются разными значениями частоты и амплитуды электрических осцилляций. Между активными зонами характерен высокий уровень синхронизации, который сохраняется в течение довольно длительного времени. Синхронизация осцилляций между активным и спокойным локусами существенно ниже. Полученные результаты, характеризующие организацию процесса решения задачи цианобактериальной пленкой как целостной единицы, могут служить моделью процессов организации других биосоциальных структур для решения задач.

Ключевые слова: цианобактерии, социальная организация, электрические осцилляции, биопленки, синхронизация, когерентность, координация, интеграция.



Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки, госзадание № 0159-2019-0001 и 0159-2019-0009.

Для цитаты: Греченко Т.Н., Харитонов А.Н., Жегалло А.В., Сумина Е.Л., Сумин Д.Л. Синхронизация электрических осцилляций в организации социальной жизни микроорганизмов // Экспериментальная психология. 2020. Том 13. № 3. С. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2020130310>

SYNCHRONIZATION OF ELECTRIC OSCILLATIONS IN THE ORGANIZATION OF SOCIAL LIFE OF MICROORGANISMS

TATYANA N. GRECHENKO

Institute of Psychology RAS, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7361-4714>, e-mail: grecht@mail.ru

ALEXANDER N. KHARITONOV

Institute of Psychology RAS, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4801-9937>, e-mail: ankhome47@list.ru

ALEXANDER V. ZHEGALLO

Institute of Psychology RAS, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5307-0083>, e-mail: zhegs@mail.ru

EVGENIYA L. SUMINA

Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8848-2379>, e-mail: stromatolit@list.ru

DMITRY L. SUMIN

Network Community of Researchers NISEEB, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4455-0819>, e-mail: stromatolit@list.ru

Many microorganisms form communities whose members coordinate their actions in solving common problems. One form of such communities is a biofilm. In the experiments on recovering the integrity by a damaged biofilm, data were obtained on oscillators in relatively quiet and active loci of the film formed by cyanobacteria *Oscillatoria terebriformis*. To study the interaction between different parts of the biofilm, field potentials were recorded simultaneously from two loci. The presence of a functional connection between different zones of the biofilm was revealed by calculation of the cross-correlation coefficients. The level of synchronization of field potentials between areas was determined using the coefficients of frequency and frequency-time coherence. In the loci of increased and decreased activity, different values of the frequency and amplitude of electrical oscillations were revealed. A high level of synchronization was registered between the active zones, which persisted for several seconds. The registered synchronization of oscillations between the active and quiet loci was considerably lower. The results that characterize the organization of the process of problem solving by a cyanobacterial film as an integral unit can serve as a model of the processes of organization of other biosocial structures for solving problems.

Keywords: cyanobacteria, social organization, electrical oscillations, biofilms, synchronization, coherence, coordination, integration.

Funding. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education, State Assns. nos. 0159-2019-0001 and 0159-2019-0009.



For citation: Grechenko T.N., Kharitonov A.N., Zhegallo A.V., Sumina E.L., Sumin D.L. Synchronization of Electrical Oscillations in the Organization of Social Life of Microorganisms. *Экспериментальная психология* = *Experimental Psychology (Russia)*, 2020. Vol. 13, no. 3, pp. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.17759/expsy.2020130310> (In Russ.).

Введение новых объектов в область психологических исследований имеет большое значение для получения знаний об эволюционном генезе и разнообразии психических явлений. Такими новыми объектами могут быть микроорганизмы, начиная с прокариот. Микроорганизмы в зависимости от уровней рассмотрения представляют собой удобную модель, допускающую экспериментирование с использованием инвазивных и деструктивных методик, — в частности, регистрацию таких объективных показателей, как полевые потенциалы [1; 8; 9; 23; 29].

Микроорганизмы образуют сообщества, одной из форм существования которых являются биопленки. Образование биопленок происходит под влиянием сигналов из окружающей среды и межклеточных взаимодействий [28; 29]. Сложность структуры биопленок и многообразие отношений составляющих их микробов превращают их в аналог многоклеточного организма [14]. В пользу такого представления свидетельствует также обнаруженное у бактерий известное ранее только у многоклеточных организмов явление апоптоза, задействованное в процессах дифференциации и морфогенеза и контролирующее расположение клеток и создание органов сложной формы [7; 31].

При социальном образе жизни в биологических сообществах, независимо от места объектов на эволюционной ступени, отношения между его членами предполагают взаимодействия в форме кооперации, конкуренции и разделения труда [9; 13; 14; 17; 33]. Кооперативные связи обеспечивают преимущества в репродукции, получении питания и др. и поэтому широко представлены в биологическом мире на всех уровнях организации живых существ — от генов до социума [21; 23; 28; 35]. Кооперация увеличивает общую выгоду популяции благодаря таким процессам, как разделение труда и производство общего блага [17; 31], но в сообществе индивидуумы могут также конкурировать друг с другом за ограниченные ресурсы, за место в структуре биопленки и др. [20; 22]. Наблюдаемые явления связаны с формированием социальных приоритетов, часто входящих в противоречие с необходимостью индивидуального выживания. К кооперативному «альтруистическому» поведению способны и строящие биопленки микроорганизмы, которые по своей организации являются прообразами многоклеточных эукариотных организмов. Мы предполагаем, что разные стадии социальной жизни цианобактерий характеризуются «специальным» типом электрических осцилляций, выраженным определенной частотой и пространственно-временной структурой [9]. По-видимому, эти параметры полевых потенциалов определяют уровень активности членов сообщества, вовлекаемых в процесс формирования биопленки [3].

Объектом экспериментов были цианобактерии — одна из древнейших форм жизни на Земле, эволюционный возраст которых, по некоторым данным, приближается к 3,7 млрд лет [30]. Цианобактерии *Oscillatoria terebriformis* строят биопленку, отвечающую внешним обстоятельствам и внутрисоциальным потребностям своего сообщества, преобразуя пространственную форму его организации и дифференцируя органоподобные образования [12; 13]. Весьма вероятно, что и древнейшие объединения цианобактерий образовывали сложные системы, управлявшие собственным морфогенезом, что позволяло им синхронизированно осуществлять целенаправленное коллективное поведение, в котором пространственные перемещения отдельных нитей определялись целями сообщества.



Задача проведенных нами опытов состояла в выяснении роли уровня синхронизации электрической активности цианобактерий *Oscillatoria terebriformis* на разных этапах восстановления биопленки.

Методика

Процедура исследования электрической активности. В экспериментах применялся метод регистрации электрической активности с использованием стеклянных электродов, заполненных 1 М КСl. Использовалось от одного до трех электродов, введенных в разные локусы биопленки, что определялось задачами экспериментов. Цианобактерии *Oscillatoria terebriformis* находились в среде следующего состава (в граммах на литр): NaHCO_3 – 3; Na_2CO_3 – 17; K_2HPO_4 – 0,5; NaCl – 30; KNO_3 – 2,5; MgSO_4 – 0,2; CaCl_2 – 0,04; FeSO_4 – 0,01, – что наиболее близко к естественному источнику, где была отобрана проба для исследования.

Статистический анализ. Фрагменты записи электрической активности оцифровывались и подвергались спектральному анализу в среде статистической обработки R 3,0 [2; 3]. Спектральный анализ выполнялся для исходной записи путем построения периодограммы с использованием быстрого преобразования Фурье [32]. Для анализа взаимодействий объектов определялись коэффициенты кросскорреляции и когерентности. В работе представлены индивидуальные спектрограммы оцифрованных фрагментов. Длительность оцифрованных участков составляла 3 с. Всего обработано 120 фрагментов записей биопленки *Oscillatoria terebriformis*, из них 53, полученных при регистрации электрической активности одним электродом, 67 – парой электродов при локализации в активных и спокойных областях биопленки.

Результаты

Биопленка, которую формируют цианобактерии, не имеет однотонной окраски: ее цвет варьирует от светло-зеленого до почти бурого и зависит от состояния и активности входящих в ее состав цианобактериальных нитей. Были проведены опыты, в которых при помощи стеклянных электродов из различных областей биопленки *Oscillatoria terebriformis*, неповрежденной и формируемой в зоне повреждения, регистрировали полевые потенциалы. Получены данные о состоянии осцилляторов в отличающихся по окраске локусах биопленки – активных, имеющих интенсивную зеленую окраску; спокойных (желтовато-зеленых); светло-зеленых, в которых формирование структур только начиналось.

Результаты показали, что частота и амплитуда электрических осцилляций зависит от расположения регистрирующих электродов в локусах повышенной и сниженной активности (в наших опытах в локусах, отличающихся по окраске) (рис. 1, 2А). Электрическая активность представлена колебаниями, частота которых от 0,5 до 45 Гц. Для спокойных областей типичны полевые потенциалы частотой 2–7 Гц, а для активных 20–30 Гц; но возможно как расширение, так и сужение частотного диапазона колебаний электрических потенциалов. Осцилляции могут образовывать паттерны различной длины и иметь разную временную структуру (рис. 1А, 1Б). Для выявления временной структуры веретен применялся автокорреляционный анализ.

Для изучения взаимодействия между различными частями биопленки были выполнены опыты по регистрации потенциалов одновременно из двух локусов. Наличие функциональной связи между разными зонами биопленки выявлялось при помощи коэффициентов кросскорреляции, затем эти связи подвергались и когерентному анализу.

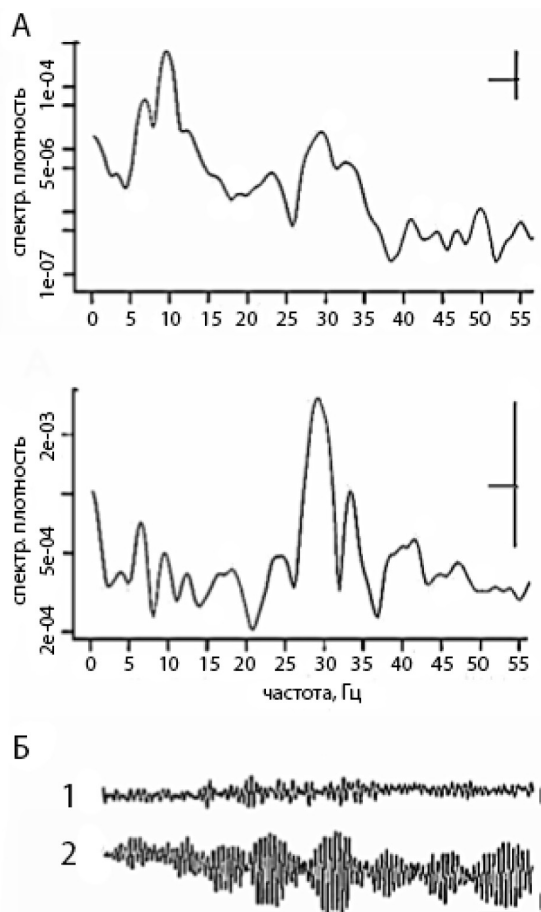


Рис. 1. Частотные характеристики электрических осцилляций в двух локусах цианобактериальной пленки – низкой и повышенной активности: А – периодограммы активностей, показанных на Б. По оси абсцисс – частота в Гц, по оси ординат – спектральная плотность в условных единицах. Горизонтальная черта – полоса пропускания, вертикальная черта – 95% доверительный интервал. Б – полевые потенциалы, зарегистрированные одновременно в спокойной и активном локусе биопленки *Oscillatoria terebriformis*. 1 – осцилляции спокойной зоны, 2 – осцилляции в активной зоне. Калибровка: 20 мкВ, 300 мс.

Уровень синхронизации полевых потенциалов между областями определяли при помощи коэффициентов частотной и частотно-временной когерентности (рис. 2Б, 2В). Высокий уровень синхронизации, при котором коэффициент частотной когерентности достигает максимального значения, характерен для активных зон (рис. 2Б); график частотно-временной когерентности показывает, что высокий уровень синхронизации сохраняется в течение довольно длительного времени – в приведенном случае 6 с (не исключено, что и дольше: анализируемый интервал ограничен временем наблюдения). Иначе выглядят показатели, демонстрирующие синхронность осцилляций между активным и спокойным локусом (рис. 2В): достижение максимального значения коэффициента когерентности в этом случае является кратковременным, может располагаться как на низких, так и на высоких частотах, что отражает график частотно-временной когерентности.

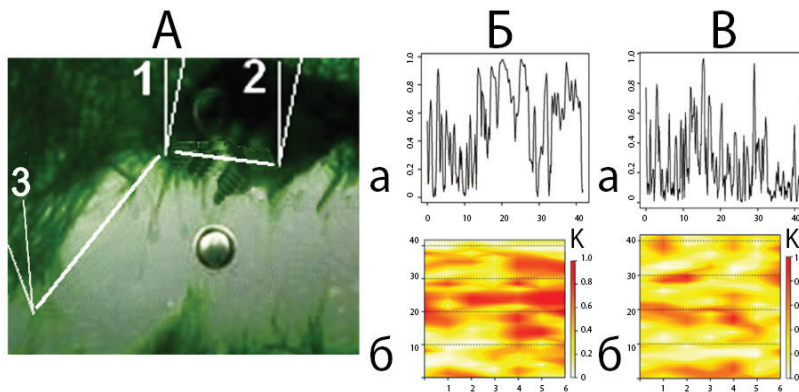


Рис.2. Взаимодействие между локусами цианобактериальной пленки, индивидуумы которых в разной степени вовлечены в активное строительное поведение: А — расположение электродов; Б — фазово-частотная (а) и частотно-временная (б) когерентность электрической активности элементов, расположенных в центре зоны активности (электроды 1 и 2); В — в зоне регистрации электродов (3) и (1). Обозначения для (а): ось абсцисс — частота в Гц, ось ординат — коэффициент когерентности; для (б): ось абсцисс — время в секундах, ось ординат — частота в Гц; К — коэффициент когерентности

Обсуждение

Опыты, выполненные на цианобактериях, показали, что синхронизированные электрические осцилляции могут быть объективными показателями, характеризующими активность микробной социальной структуры. Главный результат опытов показал, что для выполнения социально значимой задачи необходим высокий уровень синхронизации электрической активности, инициируемой членами сообщества.

Идея о том, что синхронность колебаний биопотенциалов относится к числу электрографически выраженных явлений, благоприятных для функционирования элементов биологической системы, известна с 50-ых гг. прошлого века [5]. Основным методом исследования синхронности электрической активности различных участков биологического вещества является когерентный анализ. Например, в опытах на людях найдено, что при взаимодействии участников во время решения задачи для достижения общей цели осцилляторная активность определенных областей мозга синхронизируется и ее вспышки ассоциируются с действиями партнеров [24; 25]. Результаты охватывают объективные показатели в виде регистрации электрически выраженных событий головного мозга человека и животных, движений глаз и словесного отчета испытуемых при решении когнитивных задач, слушании музыки или текстов [4; 18; 26; 27]. Эта активность по поводу достижения цели проходит на фоне синхронизированных процессов определенных областей мозга у каждого участника и между участниками [34] и зависит от уровня их подготовки к определенному виду деятельности [19]. Коэффициент когерентности тем выше, чем выше уровень синхронизации электрических потенциалов.

Результаты выполненных нами измерений позволяют заключить, что синхронизация активностей при решении задач, требующих совместных действий, необходима не только для многоклеточных существ, но и для микроорганизмов, которые решают проблемы, объединив усилия тысяч индивидов. Опыты показали, что уровень синхронизации, измеряемый коэффициентом когерентности, дает возможность оценить эффективность поведения



у живых существ, занимающих первые строчки в истории развития жизни, в данном случае у прокариот — цианобактерий *Oscillatoria terebriformis* (рис. 2 Б).

Бактерии существуют в сообществах и координируют свое поведение для выполнения специфических функций. Техника генетики и молекулярной биохимии в соединении с микроскопной визуализацией показала, что развитие биопленки является хорошо регулируемым процессом, в котором бактерии интегрируются в сообщества посредством внутренней и внешней сигнализации. Сложность создания биопленки заставляет предполагать, что это способ развития, в котором изменение формы и функции играет ведущую роль в жизненном цикле бактерий. Создание сообщества требует координированных действий участников, между которыми происходит коммуникация [9; 10; 17; 29]. Межклеточные контакты, представленные разнообразными экстрацеллюлярными структурами — микрофибриллами, шишковидными выступами, эвагинатами клеточных стенок, капсулами, — отражают генетически детерминированную закономерность развития микробных популяций как саморегулирующихся многоклеточных систем [8].

Таким образом, уровни синхронизации электрической активности у цианобактерий *Oscillatoria terebriformis* обеспечивают эффективность поведения этих существ: когерентность сигналов выше для локусов, в которых усилия элементов сообщества целенаправлены. Цианобактериальная пленка не полностью охвачена «строительными работами»: выделены области, от членов которых требуется наиболее активное участие. Это означает, что происходит дифференциация пространства, разделение его на пострадавшие зоны и зоны благополучные для жизни сообщества. Очевидно, происходит функциональная специализация: в работу по восстановлению пленки вовлекаются ближайшие к месту повреждения цианобактериальные нити. О феномене «разделения труда» в микробном социуме свидетельствуют факты электрофизиологических опытов [2] и данные микробиологических исследований [11]. Предположение о специализированных членах сообщества опирается на результаты работ по электронной микроскопии — в частности, в ряде работ показана морфологическая гетерогенность микробных популяций, установлены закономерности в изменении структуры микробных сообществ на разных этапах развития, проявляющиеся в изменении соотношения различных типов клеток: физиологически активных, покоящихся, автолизированных и инволюционных [11; 36]. Гетерогенность популяции представляет собой результат реализации адаптивного потенциала, изначально свойственного конкретному микроорганизму. Иными словами, она является инструментом раскрытия новых приспособительных возможностей одного и того же бактериального генома [6]. Полученные результаты совпадают с результатами работ, выполненных на людях и высокоорганизованных животных [5; 15; 16; 34]. Опыты на живых существах разного эволюционного уровня показывают, что истоки избирательной пространственной синхронизации, в результате которой устанавливаются функциональные отношения между разнородными зонами современных биологических систем — зонами мозга, участками биопленки и др., — возникли в жизни одних из самых ранних организмов нашей планеты. Актуализация этих функциональных отношений в форме поведения определенного типа является результатом интеграции деятельности этих зон.

Литература

1. Греченко Т.Н., Харитонов А.Н., Орлеанский В.К., Жегалло А.В. Новые объекты психологических исследований и перспективы развития науки // История российской психологии в лицах. Дайджест. 2017. № 6. С. 248–259.



2. Греченко Т.Н., Харитонов А.Н., Жегалло А.В. Социальные структуры и коммуникации в мире микроорганизмов // Экспериментальная психология. 2019. Т. 12. № 4. С. 106–119.
3. Греченко Т.Н., Харитонов А.Н., Жегалло А.В., Александров Ю.И. Психофизиологический анализ осцилляторных процессов в поведении биосоциальных систем // Психологический журнал. 2015. Т. 36. № 5. С. 78–86.
4. Зотов М.В., Андрианова Н.Е. Процессы координации в восприятии коммуникативного взаимодействия // Когнитивные исследования / Ред. Д.В. Ушаков, А.А. Медынцева. М.: Институт психологии РАН, 2017. С. 50–67.
5. Ливанов М.Н. Пространственная организация процессов головного мозга. М.: Наука, 1972.
6. Магданова Л.А., Голянская Н.В. Гетерогенность как адаптивное свойство бактериальной популяции // Микробиология. 2013. Т. 82. № 1. С. 3.
7. Николаев Ю.А., Плакунов В.К. Биопленка – город микробов или аналог многоклеточного организма // Микробиология. 2007. Т. 76. № 2. С. 149–163.
8. Новик Г.И., Высоцкий В.В. Архитектоника популяций бифидобактерий – субмикроскопический аспект когезии клеток *Bifidobacterium adolescentis* и *Dofidobacterium bifidum* // Микробиология. 1995. Т. 64. № 2. С. 222–227.
9. Олескин А.В. Биосоциальность одноклеточных (на материале исследований прокариот) // Журн. общей биологии, 2009. Т. 70. С. 35–60.
10. Романова Ю.М., Смирнова Т.А., Андреев А.Л., Ильина Т.С., Диденко Л.В., Гинцбург А.Л. Образование биопленок – пример социального поведения бактерий // Микробиология. 2006. Т. 75. № 4. С. 556–561.
11. Рыбальченко О.В. Морфо-физиологические аспекты взаимодействий микроорганизмов в микробных сообществах: дисс. д-ра биол. наук. 03.00. Спб., 2003.
12. Сумина Е.Л. Поведение нитчатых цианобактерий в лабораторной культуре // Микробиология. 2006. Т. 75. № 4. С. 532–537.
13. Харитонов А.Н., Греченко Т.Н., Сумина Е.Л., Сумин Д.Л., Орлеанский В.К. Социальная жизнь цианобактерий // Дифференционно-интеграционная теория развития. Кн. 2 / Ред. Н.И. Чуприкова, Е.В. Волкова. М.: Языки славянской культуры, 2014. С. 283–302.
14. Шатино Дж. А. Бактерии как многоклеточные организмы // В мире науки. 1988. № 8. С. 46–55.
15. Шарова Е.В. Фазово-частотный анализ в изучении нестабильности электроэнцефалограммы // Физиология человека. 1980. Т. 6. № 2. С. 211–219.
16. Ahn S., Zaubler E., Worth R.M., Witt Th., Rubchinsky L. L. Interaction of synchronized dynamics in cortex and basal ganglia in Parkinson's disease // European Journal of Neuroscience. 2015. Vol. 42. P. 2164–2171.
17. Ben-Jacob E., Cohen I., Gutnick D. Cooperative organization of bacterial colonies: from genotype to morphotype // Annu. Rev. Microbiol. 1998. Vol. 52. P. 779–806.
18. Bhattacharya J., Petsche H., Pereda E. Long-Range Synchrony in the Band: Role in Music Perception // Journal of Neuroscience. 2001. August 15. № 21 (16). P. 6329–6337.
19. Canolty R.T., Knight R.T. The functional role of cross-frequency coupling // Trends Cogn. Sci. 2010. № 14 (11). P. 506–515.
20. Czarán T., Hoekstra R. Microbial communication, cooperation and cheating: quorum sensing drives the evolution of cooperation in bacteria // PLoS ONE. 2009. Vol. 4. № 8. P. 1–10.
21. Dumas G., Nadel J., Soussignan R., Martinerie J., Garnero L. Inter-Brain Synchronization During Social Interaction // PLoS ONE. 2010. Vol. 5. № 8. e12166. doi.org/10.1371/journal.pone.0012166
22. Fiegna F., Velicer G.J. Exploitative and hierarchical antagonism in a cooperative bacterium // PLoS Biol. 2005 Nov; 3(11): e370. doi.org/10.1371/journal.pbio.0030370. Epub 2005, Nov 1.
23. Fries P. Rhythms for cognition: communication through coherence // Neuron. 2015. Vol. 88. P. 220–235.
24. Funane T., Kiguchi M., Atsumori H., Sato H., Kubota K., Koizumi H. Synchronous activity of two people's prefrontal cortices during a cooperative task measured by simultaneous near-infrared spectroscopy // J. Biomed Opt. 2011. Vol. 16. № 7. 077011.
25. Hu Yi, Hu Yi, Li X., Pan Y., Cheng X. Brain-to-brain synchronization across two persons predicts mutual prosociality // Social Cognitive and Affective Neuroscience. 2017. № 12 (12). P. 1835–1844. doi: 10.1093/scan/nsx118
26. Kelong Lu, Ning Hao. When do we fall in neural synchrony with others? // Social Cognitive and Affective Neuroscience. 2019. Vol 14. № 3. P. 253–261. doi.org/10.1093/scan/nsz012



27. Kingsbury L., Huang S., Wang J., Gu K., Golshani P., Wu Y.E., Hong W. Correlated Neural Activity and Encoding of Behavior across Brains of Socially Interacting Animals // *Cell*. 2019. № 178. P. 429–446.
28. Liu J., Prindle A., Humphries J., Gabalda-Sagarra M., Munehiro A., Lee D.D., Ly S., Garcia-Ojalvo J., Suel G.M. Metabolic co-dependence gives rise to collective oscillations within biofilms // *Nature*. 2015. Vol. 30. № 523. P. 550–554.
29. Masi E., Ciszak M., Santopolo L., Frascella A., Giovannetti L., Marchi E., Viti C., Mancuso S. Electrical spiking in bacterial biofilms // *Journal of the Royal Soc., Interface*. 2015. Jan 6. № 12 (102): 20141036. doi: 10.1098/rsif.2014.1036
30. Nutman A.P., Bennett V.C., Friend C.R.L., van Kranendonk M.J., Chivas Allan R. Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures // *Nature*. 2016. № 537 (7621). P. 535–538. doi: 10.1038/nature19355. Epub 2016 Aug 31
31. Oleskin A.V., Shenderov B.A. Probiotics and Psychobiotics: the Role of Microbial Neurochemicals // *Nature*. 2019. № 11 (4). P. 1071–1085. doi: 10.1007/s12602-019-09583-0 PMID: 31493127
32. Shumway R.H., Stoffer D.S. Time series analysis and its applications. Springer Texts in Statistics, 2011.
33. Shapiro J.A. The significances of bacterial colony patterns // *BioEssays*. 1995. Vol. 17. № 7. P. 597–607.
34. Snyder A.C., Issar D., Smith M.A. What Does Scalp EEG Coherence Tell Us About Long-range Cortical Networks? // *Eur. J. Neuroscience*. 2018. № 48 (7). P. 2466–2481.
35. Velicer G.J., Vos M. Sociobiology of the myxobacteria // *Annu. Rev. Microbiol.* 2009. № 63. P. 599–623.
36. Von Bronk B., Schaffer S.A., Götz A., Opitz M. Effects of stochasticity and division of labor in toxin production on two-strain bacterial competition in *Escherichia coli* // *PLoS Biol* 15 (5): e2001457 <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2001457>.
37. Walter D.O. Coherence as a measure of relationship between EEG records // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1968. Vol. 24. № 3. P. 282.

References

1. Grechenko T.N., Kharitonov A.N., Orleanskij V.K., Zhegallo A.V. Novye ob'ekty psihologicheskikh issledovanij i perspektivy razvitiya nauki [New Objects of Psychological Studies]. *Istoriya rossijskoj psihologii v licah. Dajdžhest = History of Russian psychology. Digest*. 2017, no. 6, pp. 248–259 (in Russ.).
2. Grechenko T.N., Kharitonov A.N., Zhegallo A.V. Social'nye struktury i kommunikacii v mire mikroorganizmov [Social Structures and Communications in the World of Microorganisms]. *Ekspierimental'naya psihologiya = Experimental psychology, Russia*. 2019, vol. 12, no. 4, pp. 106–119 (in Russian, abstr. Engl.).
3. Grechenko T.N., Kharitonov A.N., Zhegallo A.V., Aleksandrov Yu.I. Psihofiziologicheskij analiz oscil'ljatornyh processov v povedenii biosocial'nyh sistem [Psychophysiological Analysis of Oscillatory Processes the Behavior of Biosocial Systems]. *Psihologicheskij zhurnal = Psychological Journal (Rus.)*. 2015, vol. 36, no. 5, pp. 78–86 (in Russian, abstr. Engl.).
4. Zotov M.V., Andrianova N.E. Processy koordinacii v vospriyatii kommunikativnogo vzaimodejstviya [Coordination Processes in the Perception of Communication]. *Kognitivnye issledovaniya [Cognitive Studies]*, eds. D.V. Ushakov, A.A. Medyntsev. Publ. Institut psihologii RAN, 2017, pp. 50–67 (in Russ.).
5. Livanov M.N. Prostranstvennaya organizaciya processov golovnoego mozga. Publ. Nauka, Moscow, 1972 (in Russ.).
6. Magdanova L.A., Golyasnaya N.V. Geterogenost' kak adaptivnoe svojstvo bakterial'noj populyacii [Heterogeneity as an Adaptive Property of a Bacterial Population]. *Mikrobiologiya = Microbiology (Rus.)*. 2013, vol. 82, no. 1, p. 3. (in Russ.).
7. Nikolaev Yu.A., Plakunov V.K. Bioplenka – gorod mikrobov ili analog mnogokletochnogo organizma [Biofilm: a City of Microbes or an Analog of a Multicellular Organism?]. *Mikrobiologiya = Microbiology (Rus.)*, 2007, vol. 76, no. 2, pp. 149–163 (in Russ.).
8. Novik G.I., Vysockij V.V. Arhitektonika populyacij bifidobakterij – submikroskopicheskij aspekt kogežii kletok *Bifidobacterium adolescentis* i *Dofidobacterium bifidum* [Architectonics of Bifidobacterial Population: a Submicroscopic Aspect of Cellular Cohesion of *Bifidobacterium adolescentis* and *Dofidobacterium bifidum*]. *Mikrobiologiya = Microbiology (Rus.)*, 1995, vol. 64, no. 2, pp. 222–227 (in Russ.).
9. Oleskin A.V. Biosocial'nost' odnokletochnykh (na materiale issledovanij prokariot) [Biosociality of the Unicellular Organisms: Prokaryotes]. *Zhurnal obshchej biologii = Journal of General Biology (Rus.)*, 2009, vol. 70, pp. 35–60. (in Russ.).



10. Romanova Yu.M., Smirnova T.A., Andreev A.L., Il'ina T.S., Didenko L.V., Gincburg A.L. Obrazovanie bioplenok — primer social'nogo povedeniya baktetij [Biofilm Formation as an Example of Social Behavior of Bacteria]. *Mikrobiologiya = Microbiology (Rus.)*, 2006, vol. 75, no. 4, pp. 556–56. (in Russ.).
11. Rybal'chenko O.V. Morfo-fiziologicheskie aspekty vzaimodejstvij mikroorganizmov v mikrobnnyh soobshchestvah [Morpho-Physiological Aspects of Interactions of Microorganisms in Microbial Communities]. Diss. dokt. biol. nauk. 03.00 [Doctoral Dissertation, Biology 03.00]. Publ. S-Peterb. universitet, medicinskij f-t. [Faculty of Medicine, St.Petersburg University (Rus.)], Spb., 2003 (in Russ.).
12. Sumina E.L. Povedenie nitchatyh cianobakterij v laboratornoj kul'ture [Behavior of Filamentous Cyanobacteria in Laboratory Culture] // *Mikrobiologiya = Microbiology (Rus.)*, 2006, vol. 75, no 4, pp. 532–537. (in Russ.).
13. Kharitonov A.N., Grechenko T.N., Sumina E.L., Sumin D.L., Orleanskij V.K. Social'naya zhizn' cianobakterij [Social Life of Cyanobacteria]. *Differencionno-integracionnaya teoriya razvitiya [Differentiation-Integration Theory of Development]*, eds. N.I. Chuprikova, E.V. Volkova. Publ. Yazyki slavyanskoj kul'tury, Moscow, 2014, Book 2, pp. 283–302 (in Russ.).
14. Shapiro J.A. Bakterii kak mnogokletochnye organizmy [Bacteria as Multicellular Organisms]. *V mire nauki = In the World of Science (Sci. Am., Rus. edition)* 1988, no. 8, pp. 46–55 (in Russ.).
15. Sharova E.V. Fazovo-chastotnyj analiz v izuchenii nestabil'nosti elektroencefalogrammy [Phase and Frequency Analysis in the Studies of EEG Instability]. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology (Rus.)*, 1980, vol. 6, no. 2, pp. 211–219 (in Russ.).
16. Ahn S., Zauber E., Worth R.M., Witt Th., Rubchinsky L.L. Interaction of synchronized dynamics in cortex and basal ganglia in Parkinson's disease. *European Journal of Neuroscience*, 2015, vol. 42, pp. 2164–2171.
17. Ben-Jacob E., Cohen I., Gutnick D. Cooperative organization of bacterial colonies: from genotype to morphotype. *Annu. Rev. Microbiol.*, 1998, vol. 52, pp. 779–806.
18. Bhattacharya J., Petsche H., Pereda E. Long-Range Synchrony in the Band: Role in Music Perception. *Journal of Neuroscience*, August 15, 2001, no. 21 (16), pp. 6329–6337.
19. Canolty R.T., Knight R.T. The functional role of cross-frequency coupling. *Trends Cogn. Sci.*, 2010 Nov; no. 14 (11), pp. 506–15.
20. Czarán T., Hoekstra R. Microbial communication, cooperation and cheating: quorum sensing drives the evolution of cooperation in bacteria. *PLoS ONE*, 2009, vol. 4, no. 8, pp. 1–10.
21. Dumas G., Nadel J., Soussignan R., Martinerie J., Garnero L. Inter-Brain Synchronization During Social Interaction. *PLoS ONE*, 2010, vol. 5, no. 8: e12166; doi.org/10.1371/journal.pone.0012166
22. Fiegna F., Velicer G.J. Exploitative and hierarchical antagonism in a cooperative bacterium. *PLoS Biol.* 2005 Nov; 3 (11): e370. doi.org/10.1371/journal.pbio.0030370. Epub 2005, Nov 1.
23. Fries P. Rhythms for cognition: communication through coherence. *Neuron*, 2015, vol. 88, pp. 220–235.
24. Funane T., Kiguchi M., Atsumori H., Sato H., Kubota K., Koizumi H. Synchronous activity of two people's prefrontal cortices during a cooperative task measured by simultaneous near-infrared spectroscopy. *J. Biomed Opt.*, 2011, vol. 16, no. 7, 077011.
25. Hu Yi, Hu Yi, Li X., Pan Y., Cheng X. Brain-to-brain synchronization across two persons predicts mutual prosociality. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2017, no. 12 (12), pp. 1835–1844; doi:10.1093/scan/nsx118
26. Kelong Lu, Ning Hao. When do we fall in neural synchrony with others? *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2019, vol 14, no. 3, pp. 253–261; doi.org/10.1093/scan/nsz012.
27. Kingsbury L., Huang S., Wang J., Gu K., Golshani P., Wu Y.E., Hong W. Correlated Neural Activity and Encoding of Behavior across Brains of Socially Interacting Animals. *Cell.* 2019, no. 178, pp. 429–446.
28. Liu J., Prindle A., Humphries J., Gabalda-Sagarra M., Munehiro A., Lee D.D., Ly S., Garcia-Ojalvo J., Suel G.M. Metabolic co-dependence gives rise to collective oscillations within biofilms. *Nature*, 2015, vol. 30, no. 523, pp. 550–554.
29. Masi E., Ciszak M., Santopolo L., Frascella A., Giovannetti L., Marchi E., Viti C., Mancuso S. *Electrical spiking in bacterial biofilms.* *Journal of the Royal Soc., Interface.* 2015, Jan 6, no. 12 (102): 20141036. doi: 10.1098/rsif.2014.1036
30. Nutman A.P., Bennett V.C., Friend C.R.L., van Kranendonk M.J., Chivas Allan R. Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures. *Nature*, 2016, no. 537 (7621), pp. 535–538. DOI:10.1038/nature19355. Epub 2016 Aug 31.
31. Oleskin A.V., Shenderov B.A. Probiotics and Psychobiotics: the Role of Microbial Neurochemicals. *Nature*, 2019, no. 11 (4): 1071–1085. DOI:10.1007/s12602-019-09583-0 PMID: 31493127



32. Shumway R.H., Stoffer D.S. Time series analysis and its applications. Springer Texts in Statistics, 2011.
33. Shapiro J.A. The significances of bacterial colony patterns. *BioEssays*, 1995, vol. 17, no. 7, pp. 597–607.
34. Snyder A.C., Issar D., Smith M.A. What Does Scalp EEG Coherence Tell Us About Long-range Cortical Networks? *Eur. J. Neuroscience*, 2018, no. 48 (7), pp. 2466–2481.
35. Velicer G.J., Vos M. Sociobiology of the myxobacteria. *Annu. Rev. Microbiol.*, 2009, no. 63, pp. 599–623.
36. Von Bronk B., Schaffer S.A., Götz A., Opitz M. Effects of stochasticity and division of labor in toxin production on two-strain bacterial competition in *Escherichia coli*. *PLoS Biol.* 2017, May 1; 15 (5): e2001457. doi 10.1371/journal.pbio.2001457. eCollection 2017 May.
37. Walter D.O. Coherence as a measure of relationship between EEG records // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 1968, vol. 24, no. 3, p. 282.

Информация об авторах

Греченко Татьяна Николаевна, доктор психологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт психологии РАН (ФГБУН «ИП РАН»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7361-4714>, e-mail: grecht@mail.ru

Харитонов Александр Николаевич, кандидат психологических наук, старший научный сотрудник, Институт психологии РАН (ФГБУН «ИП РАН»), ведущий научный сотрудник, Московский государственный психолого-педагогический университет (ГБОУ «МГППУ»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4801-9937>, e-mail: ankhome47@list.ru

Жегалло Александр Владимирович, кандидат психологических наук, старший научный сотрудник, Институт психологии РАН (ФГБУН «ИП РАН») и Московский государственный психолого-педагогический университет (ГБОУ «МГППУ»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5307-0083>, e-mail: zhegs@mail.ru

Сумина Евгения Леонидовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Геологический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Геологический факультет ФГБОУ ВО «МГУ»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8848-2379>, e-mail: stromatolit@list.ru

Сумин Дмитрий Леонидович, палеонтолог, сетевое исследовательское сообщество САНИПЭБ, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4455-0819>, e-mail: stromatolit@list.ru

Information about the authors

Tatyana N. Grechenko, Dr. Sci. in Psychology, Leading Researcher, Institute of Psychology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7361-4714>, e-mail: grecht@mail.ru

Alexander N. Kharitonov, Cand. Sci. in Psychology, Senior Researcher, Institute of Psychology Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Moscow State University of Pedagogy and Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4801-9937>, e-mail: ankhome47@list.ru

Alexander V. Zhegallo, Cand. Sci. in Psychology, Senior Researcher, Institute of Psychology, Russian Academy of Sciences, and Moscow State University of Pedagogy and Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5307-0083>, e-mail: zhegs@mail.ru

Evgeniya L. Sumina, Cand. Sci. in Biology, Researcher, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8848-2379>, e-mail: stromatolit@list.ru

Dmitry L. Sumin, paleontologist, Network Community of Researchers NISEEB, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4455-0819>, e-mail: stromatolit@list.ru

Получена 08.02.2020

Received 08.02.2020

Принята в печать 22.09.2020

Accepted 22.09.2020