

***В. А. Крыленков, А. Е. Гончаров***

***МИКРОБИОТА ЗЕМНОЙ КРИОСФЕРЫ***



**Санкт-Петербург  
ФОЛИАНТ  
2019**

УДК 576.8.095:578.233:624.142

ББК 28.4

К85

**Рецензент** — Л. П. Зуева, заведующая кафедрой эпидемиологии, паразитологии и дезинфектологии Северо-Западного государственного медицинского университета им. И. И. Мечникова, д-р мед. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, главный эпидемиолог Министерства здравоохранения РФ по СЗФО

**Крыленков, В. А.**

К85 **Микробиота земной криосферы / В. А. Крыленков, А. Е. Гончаров.**— СПб. : Фолиант, 2019.— 448 с.

ISBN 978-5-93929-300-6

Книга представляет собой обзор современных исследований микроорганизмов, обитающих в криогенных средах нашей планеты, а также некоторых инженерных технологий их извлечения из глубин ледяных щитов и холодных вод. В монографии обсуждаются вопросы биологического разнообразия микробиоты криогенных мест обитания, освещены механизмы адаптации клеток к изменяющимся условиям окружающей среды, различные аспекты сохранения и изменения вирулентности патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, роль микробной биомассы в качестве одного из факторов развития процессов глобального потепления. Особый интерес представляет оценка авторами криосферы в качестве модельного объекта для изучения распределения микроорганизмов в самых различных биотопах и исследования пределов распространения живой материи вне нашей планеты.

Для специалистов различных отраслей биологии и медицины, в том числе микробиологов, специалистов в области медицинской микробиологии и эпидемиологии инфекционных заболеваний, генетиков, экологов и почвоведов. Книга может представлять интерес для исследователей в области наук о Земле, например для мерзлотоведов, гляциологов, океанологов, геологов, геохимиков и др., а также для студентов и аспирантов, изучающих естественнонаучные дисциплины или специализирующихся в медицине.

УДК 576.8.095:578.233:624.142

ББК 28.4

ISBN 978-5-93929-300-6

© В. А. Крыленков, А. Е. Гончаров, 2019 г.  
© ООО «Издательство Фолиант», 2019 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

Предисловие . . . . .	6
От авторов . . . . .	8
Список сокращений . . . . .	10
<b>Глава 1. ОПИСАНИЕ КРИОСФЕРЫ . . . . .</b>	<b>12</b>
Проблемы и возможности молекулярно-генетического анализа микроорганизмов в различных средах их обитания на Земле . . . . .	16
<b>Глава 2. МИКРОБИОТА АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ . . . . .</b>	<b>22</b>
Проблемы отбора проб воздуха . . . . .	22
Содержание микроорганизмов в воздухе и в атмосферных облаках . . . . .	25
Признаки жизнедеятельности микроорганизмов в атмосфере Земли . . . . .	28
Участие микроорганизмов в формировании ледяных ядер конденсации (в процессах нуклеации). . . . .	30
Метагеномика атмосферы . . . . .	34
Молекулярно-филогенетические исследования микробиоты атмосферы. . . . .	37
Стрессовые реакции микроорганизмов в воздушной (облачной) среде их обитания . . . . .	43
<b>Глава 3. МИКРОБИОТА СНЕЖНОГО ПОКРОВА . . . . .</b>	<b>52</b>
Снежный покров как среда обитания микроорганизмов. . . . .	55
Микробиота снежных покровов полярной суши . . . . .	58
Микробиота снежного покрова полярных ледников . . . . .	78
Микробиота снежного покрова горных ледников . . . . .	81
Микробиота снежного покрова морского льда . . . . .	85
Экосистемные функции снежного покрова . . . . .	88
<b>Глава 4. МИКРОБИОТА ШЕЛЬФОВЫХ ЛЕДНИКОВ, МОРСКИХ ЛЬДОВ И ХОЛОДНОЙ ВОДЫ ОКЕАНОВ И МОРЕЙ . . . . .</b>	<b>97</b>
Микробиота шельфовых ледников . . . . .	100
Микробиота морского льда . . . . .	109
Микробиота холодной воды океанов и морей. . . . .	115
<b>Глава 5. МИКРОБИОТА ЛЕДНИКОВ НА СУШЕ . . . . .</b>	<b>126</b>
Микробиота антарктических подледниковых озер . . . . .	143

Глава 6. <b>МИКРОБИОТА ПОЛЯРНЫХ И ГОРНЫХ ОЗЕР</b> . . . . .	166
Микробиота арктических озер . . . . .	166
Микробиота антарктических озер . . . . .	169
Микробиота горных (альпийских) озер . . . . .	184
Вирусы в холодной воде и во льду озер . . . . .	187
Глава 7. <b>МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ЗОНЫ, УГЛЕРОДНЫЙ ЦИКЛ И ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА</b> . . . . .	195
Зоны вечной мерзлоты на нашей планете . . . . .	196
Роль углеродного пула в вечной мерзлоте . . . . .	202
Некоторые оценки последствий изменения климата Земли для мерзлотных регионов . . . . .	211
Международные усилия, направленные на изучение природных процессов в изменяющейся Арктике . . . . .	216
Глава 8. <b>МИКРОБИОТА В ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ</b> . . . . .	220
Адаптации в микробной клетке для жизни при низких и отрицательных температурах . . . . .	220
Свойства мерзлотных изолятов . . . . .	222
Мерзлота как среда обитания микроорганизмов . . . . .	228
Разнообразие микроорганизмов и состав их сообществ в вечной мерзлоте	234
Метагеномика и сведения об «омик»-подходах в исследованиях разнообразия мерзлотной микробиоты . . . . .	239
Роль мобильных генетических элементов в вечной мерзлоте . . . . .	251
Пределы для микробной жизни в вечной мерзлоте . . . . .	260
Мерзлота как модель внеземного биома . . . . .	264
Глава 9. <b>ПАТОГЕННАЯ МИКРОБИОТА ЗЕМНОЙ КРИОСФЕРЫ И ПРИРОДНАЯ ОЧАГОВОСТЬ ИНФЕКЦИЙ В ПОЛЯРНЫХ РЕГИОНАХ</b> . . . . .	269
Сведения о существовании микроорганизмов-патогенов в криосфере Земли	271
Бактериальные патогены . . . . .	272
Микромицетовые патогены . . . . .	276
Угрозы вирусных инфекций в полярных регионах . . . . .	279
Клеточно-молекулярные механизмы, поддерживающие вирулентность патогенов в криогенной среде . . . . .	283
Геномные ассоциации хозяин — патоген в криофильной микробиоте . . . . .	291
Пути распространения патогенных детерминант в полярных регионах . . . . .	296
Глава 10. <b>ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБИННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛЬДА И ВОДНОЙ СРЕДЫ</b> . . . . .	303
Разработка малозатратных, информационно емких технологий глубинного зондирования труднодоступных акваторий Арктики и Антарктики . . . . .	304
Проблемы глубинных исследований толстых льдов (ледников, ледяных щитов). . . . .	312
Проблемы колонкового бурения ледяных щитов . . . . .	316
Малогобаритные буровые установки . . . . .	318
Технология обустройства скважин проплавлением льда горячей водой . . . . .	319
Зонды для выполнения миссии в подледниковое озеро Уилланс . . . . .	324
Зонды для миссии в подледниковое озеро Эллсворт . . . . .	326
Проблемы сохранения природной подледниковой среды при обустройстве скважин с открытым доступом . . . . .	326
Технологии исследования ледников, ледяных щитов и подледниковых озер без нарушения их ледяной изоляции . . . . .	330
Проблемы исследования мощных ледниковых щитов и подледниковых сред . . . . .	331

Проекты зондов для герметичного проникновения в подледниковые среды . . . . .	332
Принципы термогидравлического скоростного бурения льдов . . . . .	335
Концепция ТГБ-зонда для исследования мощных массивов льдов и подледниковых водных сред . . . . .	336
Сравнение ТГБ-крибота (Россия) с криботом VALKYRIE . . . . .	340
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> . . . . .	342
Жизнедеятельность микробиоты криосферы — фактор формирования географической оболочки нашей планеты . . . . .	342
Ключевые стратегии выживания микроорганизмов в криосфере Земли . . . . .	346
Послесловие . . . . .	355
Благодарности . . . . .	357
Библиографические ссылки . . . . .	359

Книга «Микробиота земной криосферы» — обзор современных исследований микроорганизмов, обитающих в криогенных средах нашей планеты,— написана В. А. Крыленковым и А. Е. Гончаровым — участниками межведомственной группы мониторинга полярных регионов, в деятельности которой принимают активное участие сотрудники кафедры эпидемиологии, паразитологии и дезинфектологии Северо-Западного государственного медицинского университета им. И. И. Мечникова. Задачи исследований, проводимых в рамках постоянного мониторинга полярной микробиоты, сочетающего элементы эпидемиологического надзора за полярными поселениями с молекулярно-генетической идентификацией функций и таксонов полярных сообществ прокариот и эукариот, связаны с профильным направлением научной деятельности кафедры — изучением эпидемиологии инфекций, обусловленных условно-патогенными микроорганизмами и, в частности, внутрибольничных инфекций.

Результаты исследований, обсуждаемых в настоящей монографии, свидетельствуют об универсальности механизмов адаптации микроорганизмов к меняющимся условиям окружающей среды, наблюдаемым в различных природных и антропогенных экосистемах. Благодаря изобилию и разнообразию факторов патогенности и устойчивости к антибиотикам микробиом криосферы является одним из важнейших резервуаров генов, составляющих пангеном госпитальных популяций возбудителей внутрибольничных инфекций.

Патогенные и условно-патогенные микроорганизмы (прокариоты и эукариоты), занесенные человеком в высокие широты, приспособляются к условиям изолированной среды обитания, которую создают сами люди, живущие и работающие в суровых условиях полярных регионов нашей планеты, формируя своеобразные техногенные или антропоургические природные очаги в местах расположения полярных станций и поселений.

В то же время в суровых условиях Арктики и Антарктики организм человека подвергается интенсивному воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды, что приводит к нарушению адаптационно-защитных функций и большей восприимчивости организма человека к инфекциям.

Раскрытие механизмов (феноменов) возрастания вирулентности условно-патогенных микроорганизмов при низких температурах, а также у бакте-

рий, обитающих в организмах людей, которые длительно живут в замкнутой (искусственной) среде (таких как полярные поселения и станции, подлодки и другие гермообъемы) и подвергаются перекрестной передаче различных инфекций между людьми, являются актуальнейшими задачами современной эпидемиологии и организации охраны здоровья населения полярных регионов.

В этом смысле книга является полезным источником сведений о процессах, методах и средствах, которые следует исследовать, разрабатывать и использовать для организации мониторинговых исследований различного назначения: санитарно-эпидемиологического мониторинга городской среды, стационаров и полярных поселений, а также связанных с экспертизой хозяйственной деятельности человека на основе сравнительного анализа трансформаций косных и биотических компонентов ландшафтов и акваторий под воздействием антропогенной (техногенной) нагрузки на различные экосистемы. При этом необходимо отметить, что основная идея организации мониторинговых исследований различных сред обитания человека и биогеоценозов состоит в том, что постоянно действующая система обработки результатов обследования акваторий, территорий и жителей, получаемых различными методами и средствами современной науки, является одними из самых эффективных средств минимизации отрицательных последствий хозяйственной деятельности человека на его здоровье, не менее действенных, чем даже новейшие медицинские, природоохранные и ресурсосберегающие технологии. При этом разработка и эксплуатация самих мониторинговых средств и методов являются более дешевыми.

*Л. П. Зуева,*

зав. кафедрой эпидемиологии, паразитологии и дезинфектологии Северо-Западного государственного медицинского университета им. И. И. Мечникова, д-р мед. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, главный эпидемиолог Министерства здравоохранения РФ по СЗФО

Издание книги «Микробиота земной криосферы» обусловлено потребностью ее авторов осмыслить огромный массив данных в области исследований микробиоты криосферы Земли, который был получен в последние десятилетия, а также является результатом работы межведомственной группы мониторинга полярных регионов, деятельность которой основана на логистических операциях Высокоширотной арктической, Российской антарктической и Санкт-Петербургской гималайской экспедиций. Главной целью авторов этой книги является критический анализ основных представлений о закономерностях жизнедеятельности и распространения микроорганизмов в криосфере (в мерзлой литосфере, в холодных слоях атмосферы и гидросферы) нашей планеты. Российская наука имеет заслуженный приоритет в исследованиях Арктики и Антарктики, в изучении микробиоты многолетнемерзлых грунтов и пород (работы Д. А. Гиличинского, Е. М. Ривкиной, Т. А. Вишневцевой, Е. А. Воробьевой, В. А. Щербаковой, М. А. Петровой и др.), свойств антарктического ледяного щита и кернов, извлеченных из глубокой скважины, пробуренной к подледниковому озеру Восток (работы В. Я. Липенкова, Н. И. Васильева, В. В. Лукина, а ранее — А. П. Капицы, И. А. Зотикова и Б. Б. Кудряшова). В массиве метеорологического и аккреционного льда ледяного щита Антарктиды, начиная с пионерских работ С. С. Абызова, были обнаружены микроорганизмы, в том числе и в результате российско-американо-французского сотрудничества (работы J. C. Priscu, V. C. Christner, M. J. Siegert, J. Petit, И. А. Алехиной, С. А. Булата и др.), выявлена возможность их длительного анабиоза в течение нескольких сотен тысяч лет, а также получены первые данные о свойствах микроорганизмов, проявляющих себя как хемоавтотрофы и психрофилы.

Эти комплексные исследования инициировали аналогичные исследования снежно-ледяных покровов и мерзлотных грунтов в различных регионах планеты, в том числе в Альпах, Гренландии, архипелаге Шпицберген и Тибете, которые показали, что вечная мерзлота, ледники и подледниковые среды являются динамичными микробными экосистемами с различными тепловыми режимами, физическими, гидрологическими и геохимическими характеристиками. Совокупные результаты исследований последних лет, проводимых в нашей стране и за рубежом, свидетельствуют о том, что биомасса микробиоты, за-



ключенная в криосфере Земли, является одним из определяющих факторов развития процессов глобального потепления, а огромный пул углерода органических веществ становится все более уязвимым для процессов разложения, сжигания и переноса водными стоками (так называемым гидрологическим экспортом) вследствие экосистемных нарушений и водного стресса.

Мы попытались обобщить современные знания о холодной природной среде, в которой замерзает вода, чтобы обратить внимание умного и требовательного читателя на основные направления современных исследований микробиоты криосферы Земли, рассказать о разнообразии экологических ниш обитания и составе сообществ микроорганизмов-криофилов, о их биогеохимической деятельности в криогенной среде. Мы осознаем, что исследовательский материал, изложенный в любом научном обзоре, посвященном различным аспектам той или иной отрасли знания, к моменту его издания обычно уже устаревает, тем более в условиях стремительного роста информации о микробиоте холодных экосистем, являющейся предметом рассмотрения данной публикации. Мы понимаем также, что структура изложения данного исследовательского материала является в известной мере искусственной, отражая наши собственные, далеко не идеальные, представления о порядке изложения сведений о микробиоте криосферы Земли.

Оценка изменяющейся динамики микробных сообществ криосферы Земли и их вклада в более сложные (и разнообразные) экосистемы нашей планеты остается одной из ключевых проблем в биогеохимии и экологии микроорганизмов. Скорости биохимических реакций и метаболических процессов при низких и отрицательных температурах снежно-ледниковых покровов и вечной мерзлоты становятся предельно малыми. Это приводит к тому, что микробные сообщества в криосфере Земли сохраняют жизнеспособность намного дольше, чем в любых других местах обитаниях. Различные криогенные среды и адаптированные к ним микроорганизмы представляют собой криобиосферу — часть биосферы нашей планеты, где реализуется еще не вполне изученная стратегия самосохранения и криоконсервации биологических систем. Следует заметить также, что существование криосферы является обычным состоянием поверхности и глубин многих планет Солнечной системы: семь (из девяти) известных науке планет, их спутники, а также кометы и астероиды являются криогенными по своей природе, поэтому обнаруженные в криосфере Земли жизнеспособные клетки и продукты их жизнедеятельности представляют собой возможный аналог внеземных экосистем. Если на ранних стадиях развития небесных тел существовала жизнь, то вполне вероятно сохранение ее следов в инопланетных мерзлых толщах и ледниковых покровах.

Совместные работы биологов и представителей других отраслей знания, реализующих различные методологические подходы к изучению криосферы Земли, весьма полезны при совершенствовании технологий проникновения в подледниковую среду и для перспективы исследований криосферных экосистем. Значимые результаты были получены и проанализированы либо внутри больших комплексных научных центров, либо в содружестве нескольких ведущих крупных коллективов ученых. Следует особо отметить, что существенное количество публикаций по данной теме, насчитывающее иногда более двух-трех десятков соавторов, имеют весьма приличные индексы цитируемости и созданы содружеством коллективов исследователей из разных научных учреждений и университетов. Такие комплексные исследования позволят расширить наши знания и обеспечить их применение в науке о Земле (например, в таких отраслях, как гидрометеорология, почвоведение и гляциология), а также в целях их хозяйственно-промышленного использования, для биоремедиации окружающей среды и разработки новых медицинских технологий.