

Познавательный журнал для хороших людей

НАУКА

из первых рук

www.scfh.ru

2

2⁽⁸⁷⁾
● 2020

БУДУЩЕЕ
УСКОРИТЕЛЬНОЙ
ФИЗИКИ

МЫ
И НАШИ
МИКРОБЫ

ПОЖАРЫ И ГАРИ
СИБИРСКОЙ
ТАЙГИ

САХАРНЫЙ ДИАБЕТ –
ЭВОЛЮЦИОННАЯ
ЛОВУШКА

Мертвый город
ХАРА-ХОТО
был открыт
дважды



ЦКП «СКИФ» – Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов». Фото предоставлено Проектным офисом ЦКП «СКИФ» и генеральным подрядчиком ГК «Росатом»

«В ночь на 30 июня 2017 г. группа физиков-ускорительщиков собралась в Центре управления ЦЕРН (CERN). Некоторые участники были из отделов и групп ЦЕРН, другие, как я, даже перелетели через океан. Нашей целью была проверка новой идеи по коллимации (формированию тонкого параллельно идущего потока) пучка Большого адронного коллайдера (БАК), имеющей решающее значение для грядущего улучшения самого мощного ускорителя в мире. Для изучения физики пучка БАК была назначена восьмичасовая смена. Как это часто бывает на крупных ускорительных установках, ускорительщики получают полный контроль над своими машинами поздно, чтобы минимизировать неудобства для пользователей и физиков, занимающихся детекторами частиц высокой энергией, и избежать многочисленных дневных отвлекающих факторов...» (В. Д. Шильцев)

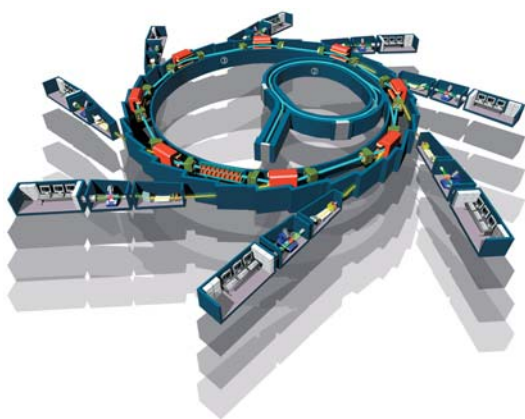
На первой стороне обложки:
Развалины Хара-Хото. 2015 г.
Фото Уильяма Линдсея

2. 2020
научно-популярный журнал



НАУКА

из первых рук



В НОМЕРЕ:

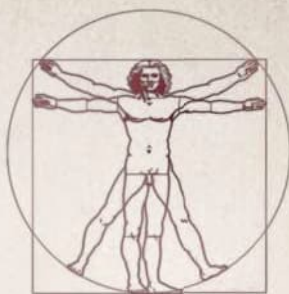
Последние десятилетия яркость пучка заряженных частиц в ускорителях удваивалась каждые восемь месяцев – в три раза быстрее, чем число транзисторов на микросхемах

Только периодические пожары могут вывести из «дремы» северные леса из лиственницы и сосны

Нечувствительность к инсулину, которая помогала первобытному человеку выживать при скудном питании, сегодня приводит к болезням обмена веществ

Лавры первооткрывателя мертвого города Хара-Хото достались путешественнику с мировым именем, а не его безвестному помощнику

Познавательный журнал
для хороших людей



Редакционная коллегия

главный редактор
акад. Н.Л. Добрецов
заместитель главного редактора
акад. В.В. Власов
заместитель главного редактора
акад. Г.Н. Кулипанов
заместитель главного редактора
Л.М. Панфилова
заместитель главного редактора
И.А. Травина
акад. И.В. Бычков
акад. М.А. Грачев
акад. А.П. Деревянко
акад. А.В. Латышев
д.ф.-м.н. Г.В. Майер
акад. В.Н. Пармон
акад. Н.П. Похиленко
чл.-кор. М.П. Федорук
д.ф.-м.н. В.Д. Шильцев
чл.-кор. А.Н. Шиплюк
акад. М.И. Эпов

Редакционный совет

акад. Н.А. Колчанов
акад. А.Э. Конторович
чл.-кор. А.Л. Кривошапкин
акад. М.И. Кузьмин
чл.-кор. И.Ю. Кулаков
акад. В.И. Молодин
д.б.н. М.П. Мошкин
чл.-кор. С.В. Нетесов
д.ф.-м.н. А.Р. Оганов
И.О. Орлов
чл.-кор. Н.В. Полосьмак
акад. В.К. Шумный
д.и.н. А.Х. Элерт

Над номером работали

к.б.н. Л. Овчинникова
Л. Панфилова
к.б.н. М. Перепечаева
А. Харкевич
Д. Ковалева
А. Мистрюков

«Естественное желание хороших
людей – добывать знание»

Леонардо да Винчи

Периодический научно-популярный журнал

Издается с января 2004 года

Периодичность: 6 номеров в год

Учредители:

Сибирское отделение Российской
академии наук (СО РАН)

Институт физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН

Институт археологии и этнографии
СО РАН

Лимнологический институт СО РАН

Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН

Институт химической биологии
и фундаментальной медицины СО РАН

Институт нефтегазовой геологии
и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

ООО «ИНФОЛИО»

Издатель: ООО «ИНФОЛИО»

Адрес редакции и издателя:
630090, Новосибирск,
ул. Золотодолинская, 11
Тел.: +7 (383) 238-37-20, 238-37-25
e-mail: lidia@info-press.ru
e-mail: zakaz@info-press.ru

www.scfh.ru

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)

Свидетельство ПИ № ФС77-37577
от 25 сентября 2009 г.

ISSN 1810-3960

Тираж 1 000 экз.

Отпечатано в типографии
ООО «ИД „Вояж“» (Новосибирск)

Дата выхода в свет 11.06.2020

Свободная цена

Перепечатка материалов только
с письменного разрешения редакции

© Сибирское отделение РАН, 2020

© ООО «ИНФОЛИО», 2020

© Институт физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН, 2020

© Институт археологии и этнографии
СО РАН, 2020

© Лимнологический институт СО РАН,
2020

© Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН, 2020

© Институт химической биологии
и фундаментальной медицины
СО РАН, 2020

© Институт нефтегазовой геологии
и геофизики им. А.А. Трофимука
СО РАН, 2020

Дорогие друзья!



Сегодня страницы многих СМИ заполнены публикациями, посвященными эпидемии новой вирусной инфекции и борьбе с ней, и на этом фоне многое отошло на второй план. Нынешняя пандемия показала, что человечество может столкнуться с совершенно неожиданными проблемами и оказаться неготовым к их решению. Поэтому ученым надо работать на опережение. А это значит, что как минимум необходим новый, уникальный инструментарий, тем более что требования к научным установкам растут в самых разных областях: от медицины и биологии до физики плазмы и элементарных частиц. Один из подходов – строительство больших научно-исследовательских комплексов, рассчитанных на одновременное использование десятками или даже сотнями исследователей. В России сейчас запланировано создание пяти таких мегасайенс-установок, в число которых входит уже строящийся под Новосибирском СКИФ – источник синхротронного излучения четвертого поколения.

СКИФ, как и большинство таких установок, базируется на ускорителях заряженных частиц высоких энергий. От ускорителей трех основных классов – коллайдеров, источников синхротронного излучения и источников нейтронов – зависят успехи многих фундаментальных и прикладных исследований в самых разных областях. Так, движение электронов высоких энергий в магнитных полях генерирует электромагнитное излучение от терагерцевых волн до рентгеновских лучей, позволяющее глубоко заглянуть в атомную структуру вещества: от вирусных белков и новых фармакологических субстанций до горных пород и полупроводников.

В новом выпуске журнала о состоянии и перспективах ускорительной физики рассказывает наш постоянный автор, известный русский и американский физик В.Д. Шильцев (Фермилаб, Батавия, США). Сегодня «узким» местом этих установок является их стоимость: ускорители рекордно высоких энергий часто стоят более 1 млрд долл., и такие расходы значимы даже для национальных экономик. Поэтому специалисты постоянно совершенствуют уже существующие и изобретают новые магнитные и радиочастотные технологии, благодаря которым стоимость больших ускорителей не растет пропорционально энергии пучка.

Пугающая вспышка ранее неизвестной инфекции заставляет нас внимательно приглядеться и к нашим собственным микроскопическим сожителям: бактериям, вирусам и грибкам, составляющим микробиоту человеческого тела. Ее вес сопоставим с такими крупными органами, как головной мозг или печень, однако деятельность и функции этого сообщества в организме изучены гораздо хуже, особенно с учетом его широчайшей изменчивости. Из статьи «Мы и наши микробы» академика В.М. Говоруна читатель узнает, как можно «полнеть из воздуха», почему в кишечнике появляется

микробный дисбаланс и к чему это может привести, а также о возможностях малоизвестной процедуры ТФМ – трансплантации микробиоты.

С сообществом кишечных бактерий связано и развитие таких болезней обмена веществ, как ожирение и метаболический синдром – предшественников диабета 2-го типа. В наши дни это когда-то редкое заболевание распространяется со скоростью эпидемии. По мнению новосибирского профессора В.В. Климонтова, причина кроется в том, что человеческий геном сформировался в условиях, значительно отличающихся от современных. И генетически обусловленное снижение устойчивости к инсулину может быть эволюционно закрепленным защитным механизмом, который был нужен для выживания при недостаточном питании и повышенных энергозатратах, в том числе на развитие и функционирование головного мозга.

Сейчас, когда рацион питания и образ жизни человека резко изменились, на борьбу с сахарным диабетом идет до 10% всех расходов здравоохранения. Не так давно выяснилось, что для коррекции работы печени и иммунного статуса при ожирении, а также в комплексном лечении сахарного диабета 2-го типа можно использовать гормон мелатонин, вырабатываемый в ночное время эпифизом. Синтетический мелатонин – безопасный и недорогой препарат, а люди с избыточным весом и больные сахарным диабетом входят в группу риска при коронавирусной инфекции.

В новом выпуске читателей также ждет драматическая история, связанная с малоизвестными и интригующими обстоятельствами открытия в начале прошлого века знаменитого тангутского мертвого города Хара-Хото, погребенного в песках Южной Гоби. Считается, что именно этот город под названием Этзина был описан Марко Поло в «Книге чудес света». И такой «исторический туризм» во время пандемии не только познавателен, но и абсолютно безопасен.

Академик Н. Л. Добрецов,
главный редактор



За последние 60 лет **УСКОРИТЕЛИ** элементарных частиц использовались в работе **КАЖДОГО ЧЕТВЕРТОГО ФИЗИКА**, отмеченного **НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИЕЙ**. С. 6

КИШЕЧНАЯ МИКРОФЛОРА не только препятствует **ИНТЕРВЕНЦИИ** патогенных **МИКРОБОВ**, но и настраивает наш **ИММУНИТЕТ**, активируя синтез антител, интерферона и информационных белков-цитокинов. С. 22



.01

ГОРИЗОНТЫ НАУКИ

- 06 **В. Д. Шильцев**
Ускорители частиц – инструменты научных открытий

.02

ЧЕЛОВЕК

- 22 **В. М. Говорун**
Мы и наши микробы
- 36 **В. В. Климонтов**
Сахарный диабет – эволюционная ловушка?
- 48 **А. В. Шурлыгина, С. В. Мичурина, Л. Н. Рачковская, А. Ю. Летягин, И. Ю. Ищенко**
Мелатонин – при диабете и ожирении показан



МЕЛАТОНИН – «ночной» гормон, регулирующий **СУТОЧНЫЕ РИТМЫ**, улучшает работу **ПЕЧЕНИ** и **ИММУННОЙ СИСТЕМЫ** при ожирении и диабете **2-ГО ТИПА**. С. 48

.03

ЧЕЛОВЕК И СРЕДА

56 **В. И. Харук, Е. И. Пономарев**
Пожары и гари сибирской тайги

.04

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ЭКСПЕДИЦИЙ

72 **А. И. Андреев**
Мертвый город Хара-Хото
был открыт дважды
Документальное расследование

«Я удивляюсь, почему **ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО** выражает **НЕУДОВОЛЬСТВИЕ** мне, и в чем **ШТАБ** находит большую нетактичность... Разве только то, что я **ОТКРЫЛ ХАРА-ХОТО** и дал первый толчок к изучению» (Цокто Бадмажапов). С. 72





ШИЛЬЦЕВ Владимир Дмитриевич – известный русский и американский физик, специалист в области физики частиц высоких энергий и физики ускорителей. Работает в отделе ускорителей Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (Фермилаб, Батавия, США). В 2001–2018 гг. возглавлял отдел коллайдера *Tevatron* и Центр физики ускорителей в Фермилаб; в 2018 г. руководил Отделением физики пучков Американского физического общества. Награжден рядом престижных премий и наград, в том числе Премией им. Нишикава за выдающиеся достижения в области ускорителей (2019)

Ускорители частиц — инструменты научных открытий

Детектор тяжелых ионов ALICE – один из семи экспериментальных детекторов, работающих на Большом адронном коллайдере.
 Фото М. Швейцера. © 2008 CERN

© В. Д. Шильцев, 2020

Сегодня из-за все более высоких запросов и усложнения передовых методов исследований растут требования к научным установкам в самых разных областях: от медицины и биологии до физики плазмы и элементарных частиц. Не единственный, но широко распространенный и эффективный подход – строительство больших (и дорогостоящих) научно-исследовательских комплексов, уникальных научных установок, рассчитанных на одновременное использование большим количеством групп и исследователей, почти всегда с широким международным участием.

Такие мегасайенс-установки являются не отдельными центрами, университетами и лабораториями, а общенациональными или даже международными проектами. Среди наиболее известных уже действующих установок – ускорительные комплексы в ЦЕРН (Швейцария) и ОИЯИ (Дубна, Россия).

В СССР в 1980-х гг. было начато строительство ускорительного комплекса УНК периметром 21 км на рекордную энергию столкновений для изучения рождения новых элементарных частиц. Из-за распада страны и сокращения финансирования науки проект был закрыт в середине 1990-х гг. В последующие два десятилетия ситуация постепенно выравнивалась:

РФ стала принимать сначала умеренное, а затем все большее участие в зарубежных мегасайенс-проектах, таких как БАК (LHC), ITER, XFEL, FAIR, ESRF.

«Первой ласточкой» в России стал международный коллайдер ионов NICA, строительство которого началось в 2016 г. в Дубне. А в 2019 г. вышел Указ Президента РФ от 25.07.2019 N356, инициировавший работы по созданию еще пяти таких установок в России. Примерная стоимость каждой – от 10 до 50 млрд руб., строиться и настраиваться они будут в течение пяти лет или более. При этом каждая из них даст уникальные возможности сотням, а в идеале и тысячам исследователей, включая международные коллаборации.

Большинство этих установок базируется на уникальных ускорителях заряженных частиц высоких энергий. Строящийся в Кольцово источник синхротронного излучения СКИФ (Сибирский кольцевой источник фотонов) – первый в России источник так называемого четвертого поколения и будущая гордость Новосибирского научного центра.

Он станет центром притяжения не только для всех специалистов новосибирского Академгородка, но и Сибири, России, всего мира. Синхротронное излучение электронов в рентгеновском диапазоне позволит глубоко заглянуть в структуру вещества: от биологических объектов и медпрепаратов до горных пород и полупроводников. Благодаря очень сложной магнитной системе СКИФ будет давать пучок синхротронного излучения с уникальной яркостью, в несколько раз превосходящей как уже работающие источники подобного класса в Швеции и Бразилии, так и те, создание которых только планируется в мире

Ключевые слова: мегасайенс-установки, ускорители, физика ускорителей, пучки высоких энергий.

Key words: megascience-facilities, accelerators, accelerator science, high-energy beams

Эта публикация является авторским переводом статьи*, опубликованной в апрельском номере *Physics Today*, главном журнале Американского физического общества. Статья была написана по заказу редакции. Причиной послужило то, что в Европе и Америке начиная с 2019 г. в сообществах ученых из разных областей науки широко обсуждаются возможные приоритеты исследований на следующее десятилетие и в более отдаленном будущем. На основании выводов, сделанных в результате обсуждений, которые могут продолжаться год-полтора из-за широкого охвата участников и мнений, финансирующие организации планируют выделить средства на фундаментальные научные исследования. Успехи во многих областях наук критическим образом зависят от ускорителей трех основных классов: коллайдеров, источников

синхротронного излучения и источников нейтронов. Поэтому состояние и перспективы физики и техники ускорителей интересуют практически всех. Англоязычная версия статьи вызвала огромный интерес, множество отзывов и даже лидировала в рейтинге популярности публикаций журнала. Я очень признателен редакции журнала «НАУКА из первых рук» за приглашение опубликовать ее на русском языке. Надеюсь, что мой рассказ и выводы будут интересны и в России, которая очень динамично начала развивать мегасайенс

* *Reproduced from Shiltsev V. Particle beams behind physics discoveries // Physics Today. 2020. V. 73. № 4. P. 32.*

URL: <https://doi.org/10.1063/PT.3.4452>, with the permission of the American Institute of Physics



В ночь на 30 июня 2017 г. группа физиков-ускорительщиков собралась в Центре управления ЦЕРН (CERN). Некоторые участники были из отделов и групп ЦЕРН, другие, как я, даже перелетели через океан. Нашей целью была проверка новой идеи по *коллимации* (формированию тонкого параллельно идущего потока) пучка Большого адронного коллайдера (БАК), имеющей решающее значение для грядущего улучшения самого мощного ускорителя в мире. Для изучения физики пучка БАК была назначена восьмичасовая смена. Как это часто бывает на крупных ускорительных установках, ускорительщики получают полный контроль над своими машинами поздно, чтобы минимизировать неудобства для пользователей и физиков, занимающихся детекторами частиц высокой энергией, и избежать многочисленных дневных отвлекающих факторов.

Одна ночь из жизни физика-ускорительщика

Мы планировали получить доступ к пучку в 10:00 вечера, но из-за проблем с криогеникой коллайдера в последнюю минуту нам пришлось ждать до полуночи. Стефано Редаелли, глава группы коллимации БАК, мой давний коллега и близкий друг, планировал это исследование в течение нескольких предыдущих месяцев. Для изучения физики пучка БАК была назначена восьмичасовая смена.

В ожидании пучка мы несколько раз просмотрели подробный пошаговый план нашего эксперимента, подкрепляясь кофе из знаменитой эспрессо-кофеварки Центра управления. БАК имеет более ста *коллиматоров* – армированных волокном графитовых пластин длиной 1,2 м – для перехвата паразитных протонов (Brüning & Collier, 2007). Они защищают сверхпроводящие магниты с полем 8 Тл и другое чувствительное оборудование от повреждения даже малым числом протонов с рекордной энергией 6,5 ТэВ (что примерно в 7 тыс. раз больше, чем энергия массы покоя), которые по каким-то причинам далеко отклоняются от заданной центральной траектории. Это происходит, к примеру,

Вскоре после полуночи 30 ноября 2009 г. БАК побил новый мировой рекорд: два пучка протонов внутри ускорителя были разогнаны до энергии 1,18 ТэВ. Фото сделано в Центре контроля ЦЕРН – большом зале, где находятся четыре консоли-«островка», контролирующие Большой адронный коллайдер, протонный синхротрон и суперпротонный синхротрон в цепи впрыска коллайдера и техническую инфраструктуру ускорительного комплекса.
© 2009 CERN

когда протоны сталкиваются либо с молекулами остаточного газа внутри вакуумной камеры, либо с пучком протонов противоположного направления в точках взаимодействия внутри одного из массивных детекторов новых элементарных частиц.

Между параллельными пластинами коллиматоров, расположенных в нескольких миллиметрах друг от друга, пролетают со скоростью света пучки протонов диаметром около 0,25 мм, чья энергия (примерно 500 МДж) сравнима с кинетической энергией летящего авиалайнера средних размеров. По сути, именно коллиматоры являются ближайшими к пучкам БАК объектами. И хотя графитовые пластины очень прочны и могут поглощать энергию рассеянных частиц, не разрушаясь, их электропроводность относительно низка, что имеет значение при очень высоких токах протонов.

После следующего крупного апгрейда БАК будет работать с гораздо более высокими токами, поэтому если коллиматоры не модифицировать, то это приведет к нестабильным поперечным колебаниям протонных пучков. План нашего ночного эксперимента заключался в том, чтобы испытать коллиматор нового типа, у которого графит был покрыт слоем материала с более высокой проводимостью толщиной 5 мкм.

Мы подготовили новый коллиматор, на поверхности которого были нанесены три параллельные полосы шириной 10 мм из карбида молибдена, нитрида титана и чистого молибдена. Помещая протонный пучок рядом с каждой из проводящих полос по очереди, мы ожидали увидеть трехкратное улучшение стабильности луча.

Получив наконец циркулирующий пучок от инжектора БАКа, мы медленно ускоряли его в течение 20 мин, пока не достигли рабочей энергии 6,5 ТэВ. Потом происходило самое интересное. Перемещая протонные пучки относительно каждой из проводящих полос, мы наблюдали за изменениями частоты поперечных колебаний пучков, чтобы определить наилучшую последовательность действий. Затем начались плановые испытания, которые закончились лишь к 5 ч утра.

С нетерпением рассмотрев предварительные результаты наших измерений, мы убедились, что пучок протонов был наиболее устойчивым вблизи полосы чистого молибдена, имеющего лучшую электрическую проводимость.

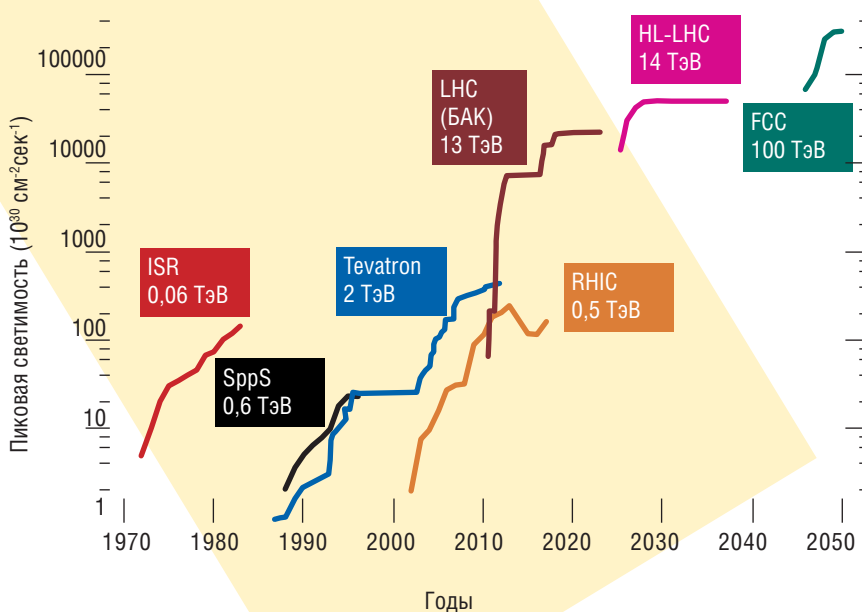
Уже в 7 ч утра я вылетел обратно в Чикаго. В течение следующих нескольких месяцев собранные данные были проанализированы, сравнены с компьютерными моделями, представлены на крупной международной конференции и опубликованы. Главное, что наш подход оказался жизнеспособным, коллиматоры с покрытием из молибдена были одобрены в рамках проекта по увеличению светимости БАК, который планируется реализовать к 2026 г.

Светимость коллайдера количественно определяет его способность рожать новые частицы посредством высокоэнергетических столкновений. Скорость производства частиц, представляющих интерес, является производением светимости и поперечного сечения для реакции рождения частицы. Для получения высокой светимости обычно требуется сжать пучки высокой интенсивности в маленький поперечный размер в месте столкновений.

Значения светимости приведены для протон-протонных и протон-антипротонных коллайдеров.

По данным автора

Для справки: при рабочей светимости БАК в 2019 г. столкновения двух протонных пучков с энергией 6,5 ТэВ приводили к рождению примерно одной частицы Хиггса каждую секунду внутри детекторов ATLAS и CMS



ISR — первый в мире адронный коллайдер, ЦЕРН
 SppS — суперпротонный синхротрон, ЦЕРН
 Tevatron — кольцевой коллайдер, Фермилаб (США)
 LHC — Большой адронный коллайдер (БАК), ЦЕРН
 RHIC — релятивистский коллайдер тяжелых ионов, Брукхейвенская национальная лаборатория (США)
 HL-LHC — проект модернизации БАК, ЦЕРН
 FCC — будущий кольцевой коллайдер, ЦЕРН

По ступенькам — к рекордам

Пока БАК, огромное подземное сооружение длиной 27 км, использующее сверхпроводящие магниты, — самый сложный научный инструмент нашего времени, но его жизненный цикл такой же, как и у его предшественников. Все ускорители сначала проектировались, строились и вводились в эксплуатацию, а затем улучшались в течение многих лет, постепенно повышая свою светимость. Такие периоды поиска путей к все более высокой светимости часто характеризуются повторяющимся циклом осознания проблем и их решений.

Так, протон-антипротонный коллайдер *Tevatron* в Фермилабе дольше всех оставался рекордсменом по энергии столкновений: с октября 1985 г. по сентябрь 2011 г. За эти четверть века было сделано более четырех десятков улучшений, касающихся физики пучков и методов ускорения, что позволило в 430 раз повысить пиковую светимость по сравнению с первоначальным расчетным значением (Holmes & Shiltsev, 2013). Эффект от некоторых из них составил 25–40%, но многие добавили всего лишь около 5%.

Многие улучшения эффективности можно провести в рабочем режиме, «на ходу» и, как правило, без

прерывания исследований по физике частиц. Но более значительные апгрейды (например, плановое увеличение светимости БАК в три раза во второй половине текущего десятилетия) требуют многих лет подготовки и долговременной остановки коллайдера для установки нового оборудования, необходимого для увеличения токов протонов и более сильной фокусировки пучков в точках взаимодействия.

Примечательно, что у всех коллайдеров есть довольно длительные периоды устойчивого экспоненциального роста светимости. Светимость самых мощных коллайдеров с 1970-х гг. до настоящего времени увеличилась в 10 тыс. раз, среднее время удвоения — приблизительно 4 года. Для сравнения вспомним закон Мура, согласно которому число транзисторов в микропроцессорных микросхемах удваивается каждые два года. С учетом сложности и размеров современных ускорителей такой быстрый темп развития их эффективности поражает воображение.

Люди, которые занимаются всем этим, — специалисты по физике пучков. Помимо рутинной поддержки работы ускорителя, они постоянно изобретают и внедряют

новые идеи, методы и подсистемы, а также совершенствуют уже существующие. Только в новом веке физики разработали дюжину оригинальных инструментов для высокоэнергетических адронных и электрон-позитронных коллайдеров, некоторые из них имеют странные для обычного уха названия: «краб-фокусировка», «электронные линзы», «нанопучки», «краб-резонаторы» и др.

Помимо физики элементарных частиц, ускорители являются основными инструментами фундаментальных и прикладных исследований в самых разных областях. В ускорителях движение электронов высокой энергии в магнитных полях генерирует электромагнитное излучение от терагерцевых волн до рентгеновских лучей. Способность источника рентгеновского излучения исследовать атомные структуры молекул для биологических и материаловедческих исследований определяется так называемой *яркостью*. Этот показатель отражает не только интенсивность потока фотонов, но и его пространственную и угловую компактность, т. е. насколько хорошо он сфокусирован (Altarelli, Salam, 2004).

Современные источники синхротронного света в 10^{11} раз ярче, чем те, которые используются в рентгеновских аппаратах в больницах. А лазеры на свободных электронах обеспечивают дополнительное увеличение яркости еще на десяток порядков, т. е. в 10 млрд раз. Увеличение яркости примерно в 10^{22} раз с середины 1960-х гг. до настоящего времени соответствует среднему времени удвоения примерно в 8 месяцев – в три раза быстрее, чем для транзисторов, и в шесть раз – для светимости коллайдеров!

Причиной такого феноменального прогресса является устойчивая эволюция технологии генерации излучения релятивистских электронов. Источники синхротронного излучения первого и второго поколений использовали свет, излучаемый электронами в кольцевых ускорителях, в качестве полезного побочного продукта. Осознание его полезности пришло быстро. Только за последние два десятилетия во всем мире было построено около 40 специализированных накопительных колец третьего поколения, производящих рентгеновские лучи высокой яркости. Они используют специально разработанные магниты, называемые *ондуляторами*, которые отклоняют электроны из стороны в сторону по типу змейки, чтобы увеличить мощность электромагнитного излучения, и могут одновременно доставлять рентгеновские лучи на несколько десятков экспериментальных станций.

УСКОРИТЕЛИ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

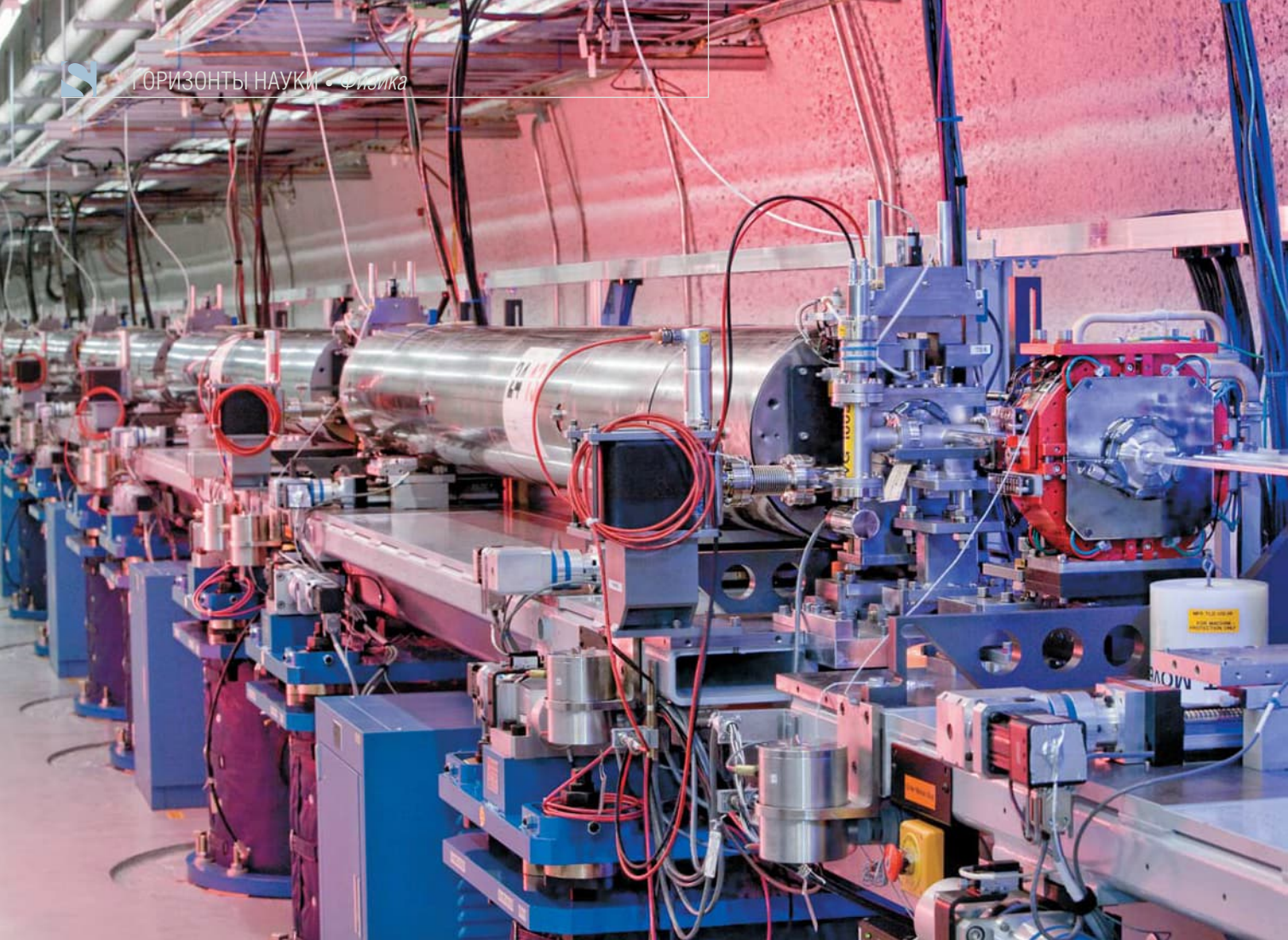
В 2011 г. исследователи Национальной ускорительной лаборатории SLAC (США) Э. Хауссекер и А. Чао решили оценить влияние ускорителей на физическое сообщество (Haussecker & Chao, 2011). Они проанализировали все исследования по физике, удостоенные Нобелевской премии, начиная с 1939 г., когда Э. Лоуренс получил эту награду за изобретение первого современного ускорителя (циклотрона), до 2009 г. Их основной вывод: ускорители были и остаются неотъемлемой частью физических исследований. Этот вывод не изменится, если учитывать награды и 2010–2018 гг.

В 1939–2018 гг. ускорители использовались в работе каждого четвертого физика, исследования на ускорителях отмечались Нобелевской премией по физике каждые три года. Еще две премии за саму науку об ускорителях были вручены после Лоуренса: награду получили Д. Кокрофт и Э. Уолтон в 1951 г. за изобретение линейного ускорителя, а половина премии 1984 г. досталась С. ван дер Мееру за разработку метода стохастического охлаждения.

Еще несколько разработок были признаны мировым научным сообществом как работы нобелевского калибра. Одна из них – это открытие в 1952 г. принципа сильной фокусировки, при котором пучок заряженных частиц проходит через переменные градиенты магнитного поля, оставаясь хорошо сфокусированным. В настоящее время этот принцип используется в большинстве ускорителей. Еще одно – изобретение лазеров на свободных электронах, в частности самоусиливающихся ЛСЭ со спонтанным излучением, которое произвело революцию в рентгеновских исследованиях. К этому списку можно добавить и впечатляющие результаты по синтезу новых сверхтяжелых элементов.

Ускорительные источники синхротронного излучения также сыграли важную роль в работе ряда лауреатов Нобелевской премии по химии: Д. Уокера (1997 г.), награжденного за открытие ферментативного характера синтеза АТФ в клетке; Р. Маккиннона (2003 г.), продемонстрировавшего структуру клеточных ионных каналов; Р. Корнберга (2006 г.), определившего структуру фермента РНК-полимеразы; А. Йонат (2009 г.), открывшей структуру и функции рибосомы; Б. Кобилка и Р. Лефковица (2012 г.) за изучения клеточных рецепторов, связанных с G-белком и ответственных за распознавание света, запахов и ряда гормонов.

Управление науки Министерства энергетики США является спонсором 28 пользовательских установок для фундаментальных исследований класса мегасайенс. Из них 16 – это ускорители: коллайдеры, источники света и источники нейтронов. Годовой бюджет на их эксплуатацию и строительство новых превышает 2 млрд долл. На этих установках ежегодно работает около 20 тыс. пользователей из академических, промышленных и государственных лабораторий. Около 400 ученых и студентов проводят исследования в области физики пучков на десятке специализированных исследовательских ускорителей и центров



Яркость источника излучения может быть увеличена в десятки раз за счет уменьшения размера электронного пучка в накопителе. За последнее десятилетие физики-ускорительщики разработали многочисленные усовершенствования, такие как ультрасовременные сверхпроводящие ондуляторные магниты, новые системы для стабилизации орбит пучка вплоть до нескольких нанометров.

Одно из впечатляющих недавних изобретений – *многоровотная ахроматическая фокусирующая оптика* (она, кстати, будет использоваться и в СКИФ), которая оптимизирует расположение и силу дипольных, квадрупольных и секступольных магнитов, задающих траекторию и размер пучка. Такая оптика может сделать размеры электронного пучка и угловые расхождения настолько малыми, что фазовое пространство излучаемых фотонов будет ограничено только дифракцией. Соответственно, на два-три порядка увеличивается и яркость источников четвертого поколения (также известных как *накопительные кольца, ограниченные дифракцией*) по сравнению с предыдущими.

Самым последним революционным достижением в производстве излучения стало самоусиливающееся

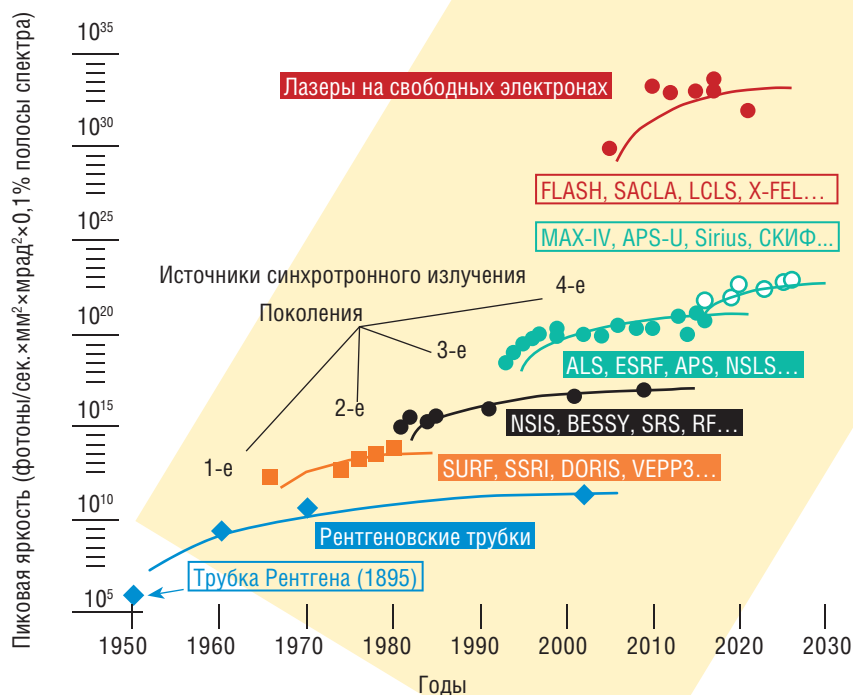
Ондулятор из 33 магнитов, отклоняющих проходящий электронный пучок на рентгеновском лазере, работающем в Национальной ускорительной лаборатории SLAC (США).

© SLAC National Accelerator Laboratory

спонтанное излучение в рентгеновских *лазерах на свободных электронах (ЛСЭ)**. ЛСЭ используют пучки электронов из линейных ускорителей. Их более высокая яркость по сравнению с источниками на основе накопительного кольца обусловлена чрезвычайно короткими и интенсивными световыми импульсами, которые генерируются короткими и очень плотными сгустками релятивистских электронов, проходящих через переменное магнитное поле в длинной линейке ондуляторов и когерентно накачивающих их собственное излучение. Для увеличения энергетической

* Кулипанов Г. Н. От субмиллиметрового – к рентгеновскому // НАУКА из первых рук. 2012. № 6(48). С. 16; Шильев В. Д. Русские корни рентгеновского лазера // НАУКА из первых рук. 2012. № 6(48). С. 15.

За годы, прошедшие с открытия В. Рентгеном рентгеновских лучей в 1895 г., пиковая яркость источников вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучения значительно возросла. Источники синхротронного излучения первого, второго, третьего и четвертого поколений базируются на электронных кольцевых ускорителях-накопителях. Основным элементом лазеров на свободных электронах являются сильноточные линейные ускорители электронов. По: (Eberhardt, 2015; с изменениями)



Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) – это новое слово в науке, так как мощность электромагнитного излучения в нем превосходит все другие источники в миллиард раз. Сложность в создании таких лазеров в том, что для усиления рентгеновского излучения нельзя использовать обычный оптический резонатор: в случае ЛСЭ излучение генерируется за один-единственный пролет электронов высокой энергии. Еще в 1947 г. советский физик В. Л. Гинзбург предложил использовать для усиления интенсивности излучения заряженной частицы периодическое магнитное поле. Но само устройство для этого – ондулятор, обеспечивающий движения электронов по волнистой траектории вдоль продольной оси, – был создан намного позже. Метод был предложен в 1980 г. сотрудниками Института ядерной физики СО АН СССР (Новосибирск) А. М. Кондратенко и Е. Л. Салдиным. Уехав после перестройки в Германию, Салдин убедил руководство национальной лаборатории DESY построить ускоритель-прототип, который заработал в начале 2000 г.

эффективности (преобразования используемой энергии в энергию излучения) сейчас предлагаются схемы на основе линейных ускорителей с рекуперацией энергии, что позволит объединить преимущества схем, использующих накопительные кольца и линейные ускорители.

Когда высокоэнергетические частицы попадают в твердые или жидкие мишени, они в изобилии производят вторичные частицы (например, мюоны, нейтрино и нейтроны), которые, в свою очередь, могут использоваться в таких приложениях, как мюонная спектроскопия, физика нейтрино и рассеяние нейтронов. Интенсивность потока вторичных частиц пропорциональна мощности первичного пучка, ускоряемого циклотроном, синхротроном или линейным ускорителем. За последние десятилетия ученым удалось увеличить эту мощность примерно на три порядка, улучшив технологию и решив множество проблем, связанных с конечным временем жизни мишеней, опасными неконтролируемыми потерями частиц и др.

Прогресс технологий

В середине XX в. произошла «ускорительная» революция: ускорители стали способны генерировать пучки с энергией частиц, превышающей на несколько порядков ту, что достижима в ядерных реакциях и лазерах (Sessler & Wilson, 2008). Тем не менее рекорды по энергии пучков росли существенно медленнее, чем по мощности, светимости или пиковой яркости.

Самые высокие энергии сталкивающихся частиц выросли с примерно 60 ТэВ в начале 1970-х гг. (на ускорителе пересекающихся накопительных колец SPS в ЦЕРН) до 13 ТэВ в 2019 г. (на БАК), что дает среднее время удвоения этой величины около 6 лет. Основной причиной такого относительно медленного прогресса энергии ускорителей является их стоимость, которая сильно зависит от используемых технологий.

Стоимость и доступность ускорителей определяют и их спектр: из более чем 30 тыс. ускорителей, действующих по всему миру, 99% относительно малы и работают с пучками низкой энергии. Они используются для коммерческого производства радионуклидов и радиофармацевтических

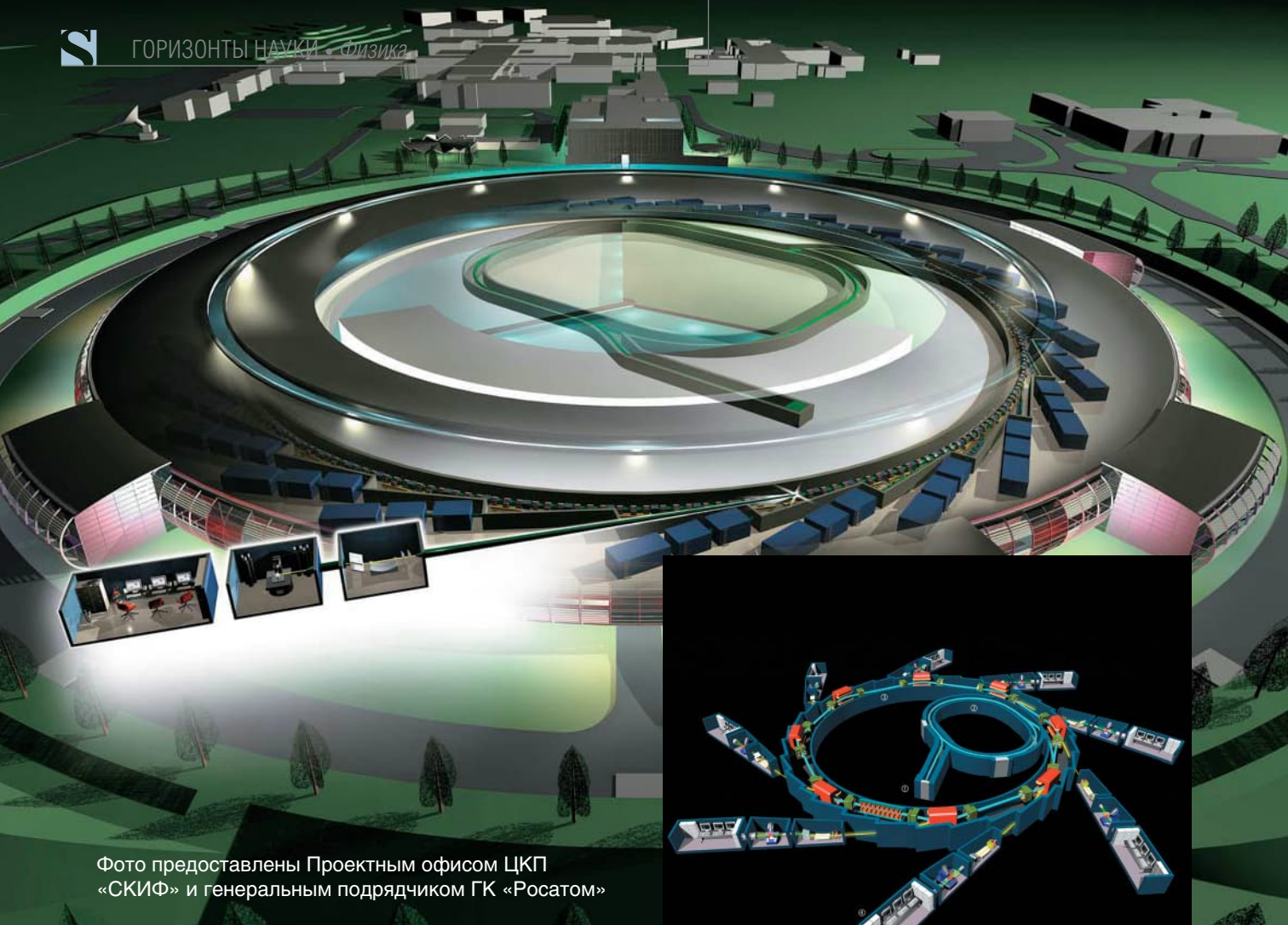


Фото предоставлены Проектным офисом ЦКП «СКИФ» и генеральным подрядчиком ГК «Росатом»



ДА БУДЕТ СКИФ!

ЦКП «СКИФ» – Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов». Эта установка класса мегасайенс, не имеющая мировых аналогов по выходным параметрам, строится в новосибирском наукограде Кольцово. Проект был разработан Институтом ядерной физики, Институтом катализа и другими организациями СО РАН, РАН и Минобрнауки РФ.

Основа ЦКП «СКИФ» – ускорительный комплекс, источник синхротронного излучения поколения 4+ с энергией электронов в 3 ГэВ. Периметр основного ускорителя СКИФ составит 476 м, его кольцо будет разделено на 18 элементов, состоящих из поворотных и прямолинейных частей: в них будут встроены устройства для генерации СИ, которое пойдет на пользовательские станции. Установка способна генерировать излучение с энергией фотонов от 1 до 100 килоэлектронвольт.

Уже стартовали работы по проектированию и комплексным инженерным изысканиям для СКИФ, идет отработка технологий создания элементов ускорительного комплекса.

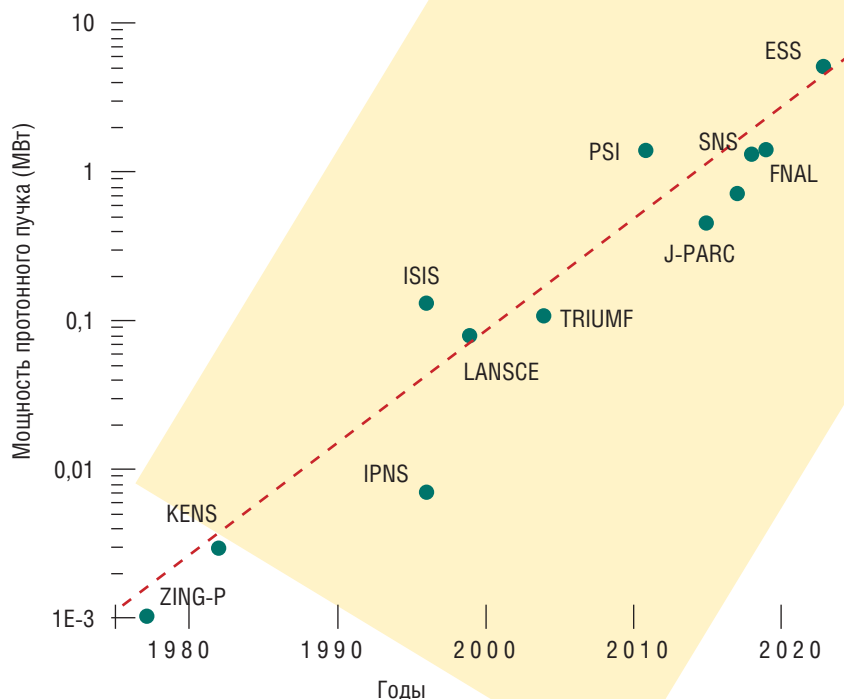
Так, в ИЯФ СО РАН разработан стенд одного из элементов инжектора, в котором будет происходить первоначальное ускорение электронов. В создании установки принимают участие специалисты из различных научных и производственных коллективов не только Новосибирска, но и Томска, Красноярска, Москвы, Калининграда, Екатеринбурга. Строительство должно завершиться к концу 2023 г., а запуск первой очереди – 6 из 30 экспериментальных станций – планируется в 2024 г. Предполагаемая общая стоимость проекта – около 37 млрд руб. На новой установке будут идти работы в области промышленных технологий, включая глубокую переработку сырья; биомедицинских технологий, в том числе направленного дизайна новых лекарственных препаратов и средств их доставки, изучения механизма патогенеза особо опасных инфекционных заболеваний; создания возобновляемых источников энергии и получения новых материалов; исследования художественных ценностей, археологических, палеонтологических находок и т. п.

Рекордная мощность пучка в ускорителях протонов значительно возросла за последние несколько десятилетий. Пунктирная линия соответствует времени удвоения мощности, равному четырем годам. По: (Lindroos et al., 2013)

препаратов, ионной имплантации, генерации нейтронов, литографии, исследований материалов, приложений в полупроводниковой промышленности, а также применяются в энергетике и при защите окружающей среды.

Лишь около 60 источников рентгеновского излучения во всем мире являются исследовательскими. А коллайдеров частиц в мире вообще только семь, включая два в новосибирском Институте ядерной физики СО РАН. И только два из них имеют энергии пучка более 100 ГэВ (100 млрд эВ): релятивистский коллайдер тяжелых ионов в Брукхейвенской национальной лаборатории (США) и БАК в ЦЕРН.

Ускорители рекордно высоких энергий часто стоят более 1 млрд долл., а устремления исследователей, работающих в физике частиц, требуют еще больших энергий, соответствующие установки, по оценкам, могут стоить на порядок дороже. Такие расходы становятся весьма заметными даже в масштабах национальных экономик. Для сокращения затрат принимаются все меры, включая повторное применение нынешних ускорителей в качестве инжекторов для новых, использование существующей инфраструктуры (электросетей, водоснабжения, дорог, туннелей и т. п.), а также распределение финансовой нагрузки между несколькими лабораториями или даже странами, как в ЦЕРН. Основные надежды на создание

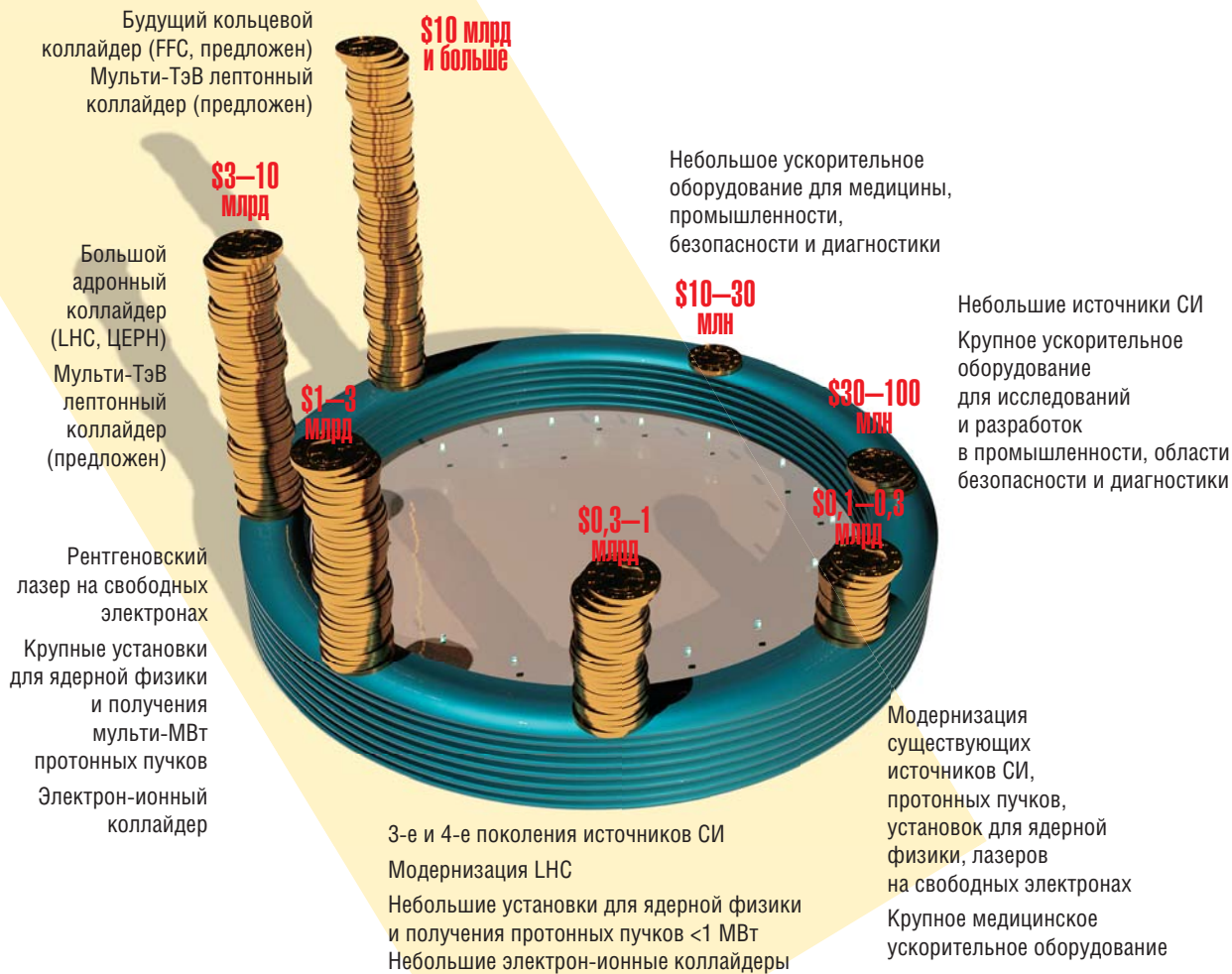


- ZING-P — Аргоннская национальная лаборатория (США);
- KENS — Национальная лаборатория высоких энергий, КЕК (Япония);
- IPNS — Аргоннская национальная лаборатория (США);
- ISIS — Национальная лаборатория Резерфорда — Эплтона (Великобритания);
- LANSCE — Лос-Аламосская национальная лаборатория (США);
- TRIUMF — Лаборатория в Ванкувере (Канада);
- PSI — Институт Пауля Шеррера (Швейцария);
- J-PARC — Исследовательский институт в Токае (Япония);
- SNS — Национальная лаборатория Ок-Ридж (США);
- FNAL — Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми (США);
- ESS — Европейский источник нейтронов (Швеция)

новых больших установок прямо связаны с улучшением их технологических характеристик и снижением стоимости, в идеале — с обоими этими показателями.

Основные современные ускорительные технологии включают теплые и сверхпроводящие магниты, а также теплые и сверхпроводящие радиочастотные резонаторы для ускорения частиц. Магниты фокусируют либо изгибают пучки в кольцевых ускорителях, а быстро изменяющиеся во времени высокочастотные электрические поля в радиочастотных полостях нужны для ускорения заряженных частиц. Туннели, электрическая инфраструктура и другие технические подсистемы могут быть довольно дорогими. Однако в полной стоимости строительства ускорителей пучков высоких энергий и больших мощностей обычно доминирует именно цена главных компонентов ускорителя — магнитов и ВЧ-структур.

За последние четверть века сообщество ускорительщиков успешно работало над снижением стоимости основных технологий. Максимальные магнитные поля в работающих ускорителях выросли с примерно 4 до 12 Тл, это означает, что вместо трех магнитов можно теперь обойтись одним. Ускоряющие электрические поля достигли рекордных максимумов,



увеличившись в три раза или более: до более чем 30 МВ/м в сверхпроводящих ВЧ-резонаторах и 100 МВ/м в теплых структурах с нормальной проводимостью, работающих при комнатных температурах.

Без улучшений магнитных и радиочастотных технологий затраты росли бы линейно с энергией пучка E , однако стоимость современных больших ускорителей увеличилась пропорционально примерно корню из E (Shiltsev, 2014). Тем не менее спрос на пучки со все более высокими энергиями опережает прогресс традиционных ускорительных технологий, поэтому исследователи продолжают искать и разрабатывать новые идеи и технологические решения.

Наука о пучках

Сегодня около 5 тыс. ученых и инженеров-ускорительщиков работают в более чем 50 странах мира и сотрудничают с примерно в три раза большим числом технических экспертов. Несмотря на то что большинство из нас глубоко вовлечены в каждодневную работу

стоимость ускорителя или его крупной модификации во многом зависит от масштаба установки и технологий, лежащих в ее основе. Она может варьировать от десятков миллионов долларов для небольших медицинских установок до десятков миллиардов для будущих коллайдеров, энергия которых превзойдет Большой адронный коллайдер. По данным автора. Идея рисунка Д. Падиан (Shiltsev V. Particle beams behind physics discoveries // Physics Today. 2020. V. 73. № 4. 32 p.)

и постоянные обновления своих установок, карьера ученого-ускорительщика включает в себя проектирование и строительство новых машин, исследования в области физики пучков, разработку важных технических компонентов и руководство проектами. К этому надо добавить передачу технологий в промышленное применение, обучение и подготовку следующего поколения экспертов по ускорителям, а также распространение знаний о наших достижениях в широких научных кругах и обществе в целом.

За последние 20 лет физика пучков превратилась в отдельную научную дисциплину со своим собственным предметом исследований и методами обучения. Ежегодно проходит серия международных конференций по ускорителям частиц, в которых участвуют около 1,5 тыс. человек, а также почти две дюжины других регулярно проводимых конференций и семинаров по всем важным темам, начиная от компьютерного моделирования до технологий ускорителей. Есть и специализированные рецензируемые журналы, ведущий из которых, *Physical Review – Accelerators and Beams*, отметил в 2018 г. свое двадцатилетие.

Каждый год несколько тысяч человек (около 1400 человек в Европе и 400 в США) проходят подготовку по физике и технике ускорителей (Barletta, Chattopadhyay, Seryi, 2012). Такую подготовку обеспечивают около 40 академических программ в университетах по всему миру, в том числе по дюжине в США и Европе. В этой связи нельзя не упомянуть и выдающуюся новосибирскую школу подготовки, базирующуюся в Новосибирском государственном университете и ИЯФ СО РАН.

Обучение физиков и инженеров-ускорительщиков также включает в себя практику на рабочем месте, которая дополняется интенсивными курсами в рамках таких программ, как школы по ускорителям в США, ЦЕРН и Дубне. Приблизительно сотня специалистов ежегодно получает степени кандидатов и докторов наук в области физики ускорителей и пучков.

Ученые-ускорительщики широко представлены во многих научных обществах, советах и группах по всему миру. Так, рабочая группа

В Европейском центре синхротронного излучения (ESRF, Франция) проводится модернизация всех систем основного кольца ускорителя – электронного синхротрона на энергию 6 ГэВ, что позволит увеличить яркость источника СИ в 30 раз. В Институте ядерной физики им Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск) разработали и изготовили для ESRF 66 октупольных магнитов, предназначенных для коррекции нелинейного движения пучка электронов. *На фото на переднем плане – октупольный магнит на специальном столе-гирдере, где идет сборка магнитной системы. Вес магнита 200 кг, гарантийный срок службы – десятки лет.*

Фото С. Гурова (ИЯФ СО РАН)





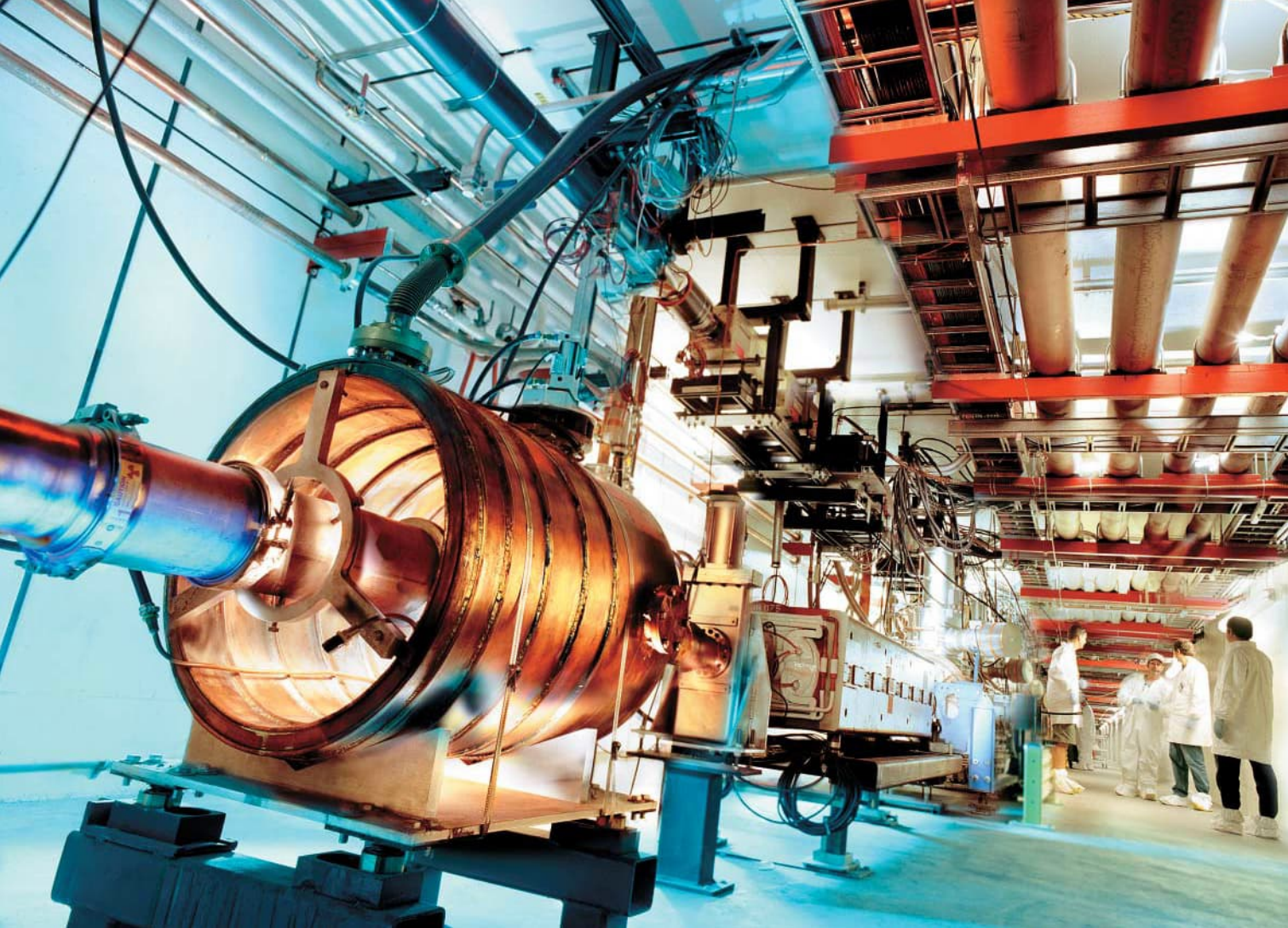
14 Международного союза теоретической и прикладной физики (UIPAP) содействует обмену информацией и мнениями между членами сообщества ускорительщиков с 2015 г., а Международный комитет по будущим ускорителям (ICFA) – сотрудничеству в области создания и использования ускорителей на высокие энергии с 1976 г.

В США финансирование исследований и разработок по физике пучков и техники в области ускорителей составляет примерно 120 млн долл. в год, поступающие в основном от Управления науки Министерства энергетики США, которое ведет программы по физике высоких энергий, фундаментальным энергетическим наукам и ядерной физике, а также от Национального научного фонда (NSF). На сегодняшний день крупнейшим спонсором является Программа по физике высоких энергий: около 5% ее годового бюджета направляется на общие исследования и разработки ускорителей. Крупные специализированные исследовательские центры по физике пучков имеются и в больших национальных лабораториях, таких как *Fermilab*, *SLAC*, Национальная лаборатория им. Лоуренса в Беркли (*Lawrence Berkeley*) и др., а также в нескольких университетах, включая

Ускоряющие структуры на основе сверхпроводящих радиочастотных резонаторов – это технология выбора для ускорителей частиц нового поколения. С их помощью можно понизить энергетические затраты на ускорение частиц пучка и улучшить его динамику, а также работать в непрерывном режиме при относительно высоком градиенте ускоряющего поля. *Фото Р. Хана. © Fermilab*

Корнелльский, Мичиганский и Университет Мэриленда. Их установки играют ключевую роль в развитии науки о пучках.

Самой большой проблемой для физиков-ускорительщиков является разработка технологий получения пучков рекордных энергий. Проблема в том, что если бы мы использовали лишь существующие технологии, то стоимость строительства коллайдеров с существенно более высокой энергией, чем тот же БАК, была бы непомерно высокой. Мы вряд ли найдем деньги или такое место на Земле, где труд, земля и сырье достаточно дешевы, чтобы использовать принцип «чем больше ускоритель, тем лучше».



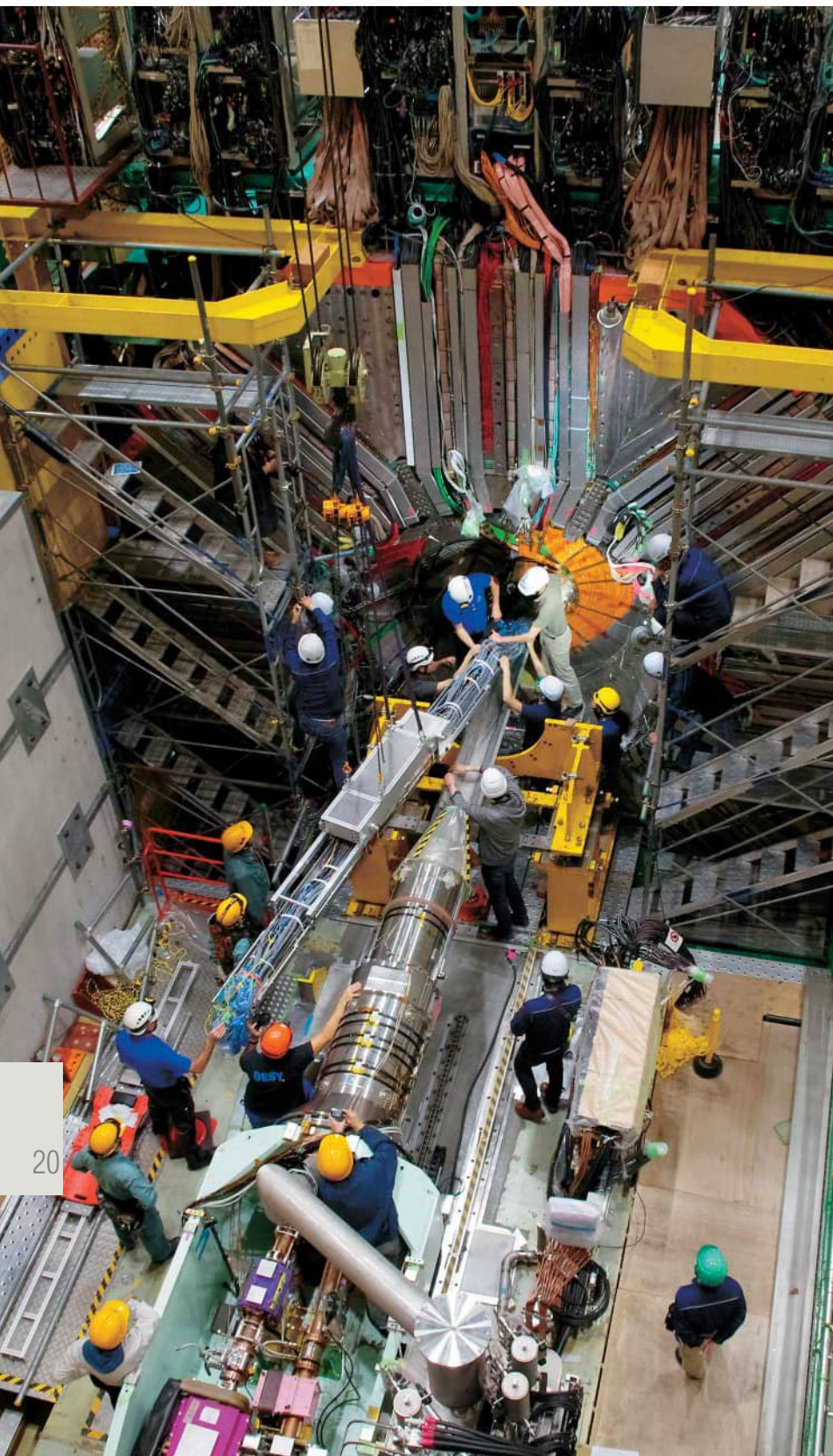
Главный инжектор *Tevatron* – двухмиллиметровая «беговая дорожка» для протонов, самый мощный действующий ускоритель частиц в Фермилабе – поставляет пучки протонов для различных экспериментов по физике элементарных частиц и испытательного стенда. Благодаря недавним улучшениям ускорительный комплекс Фермилаб производит 750-киловаттные протонные пучки, используемые для рождения самого высокоэнергетического потока нейтрино в мире, и интенсивного потока мюонов.
Фото П. Гинтера. © Fermilab

Вместо этого мы ведем разработки по нескольким направлениям. Один из подходов заключается в использовании традиционных сверхпроводящих магнитов и радиочастотных резонаторов для ускорения нетрадиционных частиц, а именно мюонов. В отличие от протонов, в которых энергия распределена между составляющими их кварками и глюонами, мюоны являются точечными частицами, отдающими в столкновениях все 100% своей энергии для рождения новых частиц.

Соответственно, энергия центра масс в мюон-мюонных столкновениях будет в 6–10 раз больше, чем

в протон-протонных при той же энергии пучка. Поэтому мюонный коллайдер на 14 ТэВ (что номинально является энергией в системе центра масс для БАК) будет приблизительно эквивалентен адронному коллайдеру на 100 ТэВ. Циклические электрон-позитронные коллайдеры при таких энергиях нецелесообразны, потому что легкие частицы теряли бы огромную энергию в виде синхротронного излучения. Но гораздо более тяжелые мюоны, имеющие массу в 207 раз больше, чем у электронов, свободны от этих проблем.

Мы разрабатывали эту стратегию в течение последних 20 лет и в настоящее время доказали концептуальную осуществимость мюонного коллайдера для сверхвысоких энергий. В 2019 г. был экспериментально продемонстрирован ключевой метод – ионизационное охлаждение мюонов. Прежде чем мы сможем окончательно убедиться в технической и экономической осуществимости такого коллайдера, придется, безусловно, решить еще много проблем, связанных, например, с эффективным и экономичным производством мюонных пучков высокой яркости. Но сама эта идея является очень многообещающей и стоит всех усилий.



Менее революционный подход, который также имеет определенные перспективы, – это продолжать совершенствовать уже существующие технологии. Предполагая, что пучки рекордных энергий следующего поколения появятся через 15–20 лет, а скорость нашего технологического прогресса не замедлится, мы можем таким образом удвоить или даже утроить рекорды по энергии частиц. Например, уже есть идеи, как создавать магниты с полем 20–24 Тл при помощи высокотемпературных сверхпроводников или как получить темпы ускорения 60–90 МВ/м используя сверхпроводящие ВЧ-резонаторы новых типов и материалов. Конечно, нужно экспериментально подтвердить потенциал таких технологий, чтобы понять, насколько новые машины станут с их помощью осуществимыми и доступными. Этим разработкам будет способствовать наше многолетнее сотрудничество со специалистами в физике твердого тела и промышленных технологий.

Одним из самых значительных достижений может стать новая технология ускорения частиц плазменными волнами, которые возбуждаются либо лазерами, либо пучками частиц. За последние 25 лет эта область развивалась и расширялась благодаря наплыву методов и идей от ученых, работающих в области плазмы и лазеров (Seryi, 2015). Так, за работы в этих смежных областях Ж. Муру и Д. Стрикленд были удостоены Нобелевской премии по физике в 2018 г. За эти десятилетия мы стали свидетелями того, что прирост энергии электронов, ускоряемых в плазменной ячейке

Электрон-позитронный коллайдер SuperKEKB построен в Японии Организацией по изучению высокоэнергетических ускорителей (КЕК). Официально запущен 26 апреля 2018 г. 2019 г. © КЕК

длиной 1 м, увеличился с нескольких мегаэлектронвольт до 9 ГэВ, со временем удвоения энергии около 2,5 лет (Joshi *et al.*, 2018).

В то же время исследователи стали лучше понимать, что требуется для создания коллайдера на основе плазменного ускорения. В настоящее время научно-исследовательская работа в области ускорения плазмы направлена не столько на разработку рекордных ускоряющих градиентов, сколько на решение более обыденных, но важных вопросов. К ним относятся эффективность использования энергии, многостадийное ускорение, сохранение высокой яркости и энергии в пучках электронов и позитронов, проходящих через плотную плазму, разработка экономичных драйверов (возбудителей) плазменных волн.

Мы еще не создали надежную техническую конструкцию для доступного электронно-позитронного плазменного коллайдера на энергию более 1 ТэВ и высокую светимость. Однако основания для оптимизма есть: в наши дни более дюжины исследовательских групп по всему миру строят испытательные установки для систематического изучения различных вариантов и ведут эксперименты по достижению оптимальных режимов ускорения.

В январском выпуске *Physics Today* за 2001 г. директор лаборатории физики элементарных частиц Корнелльского университета М. Тигнер, основополагающая и ключевая фигура современной физики ускорителей, написал статью «Есть ли будущее у физики элементарных частиц на основе ускорителей?». Он сделал много умозаключений, удивительно близких к изложенным выше, и призвал других ученых, в частности тех, кто занимается физикой элементарных частиц, помочь изучить новые идеи и повысить экономическую эффективность наших ускорителей.

Отвечая сейчас на вопрос, вынесенный в заголовок его статьи, мы можем точно сказать – да, будущее есть, и мы быстро движемся в правильном направлении. Физика пучков развилась в отдельную научную дисциплину, и сообщество ускорительщиков гордится своими достижениями: источниками синхротронного излучения четвертого поколения, рентгеновскими лазерами на свободных электронах, протонными пучками с мегаваттной мощностью, современными источниками нейтронов и нейтрино и др. Мировые рекорды были установлены по всем параметрам ускорителей, так как возможности основных технологий удвоились или даже утроились. Увеличение максимальной энергии частиц было не столь значительным, но все-таки БАК расширил эту границу в семь раз по сравнению с *Tevatron*, и это привело к открытию в 2012 г. бозона Хиггса – последнего недостающего фрагмента Стандартной модели.

Множество достижений, прорывов и открытий ждут нас впереди. Совершенствование методов ускорения частиц продолжается по нескольким направлениям, включая использование экзотических частиц, таких как мюоны, разработку более совершенных магнитов и радиочастотных резонаторов, компактных ускорителей плазмы с высоким градиентом. Достижения в физике твердого тела, лазерах, плазме и физике высоких энергий, сотрудничество с экспертами в этих дисциплинах придают нам дополнительный импульс. Ускорительщики и специалисты по физике пучков уверены, что современные исследования и разработки уже в ближайшие десятилетия приведут к созданию более эффективных и экономичных исследовательских установок на основе пучков заряженных частиц.

Лумепамыра

Altarelli M., Salam A. *The quest for brilliance: light sources from the third to the fourth generation* // *Europhys. News*. 2004. V. 35. N. 2. P. 47–50.

Barletta W., Chattopadhyay S., Seryi A. *Educating and Training Accelerator Scientists and Technologists for Tomorrow* // *Rev. Accel. Sci. Technol*. 2012. V. 5. P. 313–331.

Brüning O., Collier P. *Building a behemoth* // *Nature*. 2007. V. 448. P. 285–289.

Eberhardt W. *Synchrotron radiation: A continuing revolution in X-ray science—Diffraction limited storage rings and beyond* // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom*. 2015. V. 200. P. 31.

For more on accelerator-based light sources worldwide, see www.lightsources.org.

Haussecker E. F., Chao A. W. *The Influence of Accelerator Science on Physics Research* // *Phys. Perspect*. 2011. V. 13. N. 146.

Holmes S. D., Shiltsev V. D. *The Legacy of the Tevatron in the Area of Accelerator Science* // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci*. 2013. V. 63. P. 435–465.

Joshi C., Adli E., An W. *et al. Plasma wakefield acceleration experiments at FACET II* // *Plasma Phys. Control*. 2018. V. 60. N. 3. 14 p.

Lindroos M. *et al., In Elementary Particles: Accelerators and Colliders* / eds. S. Myers, H. Schopper // *Springer*. 2013. 514 p.

Sessler A., Wilson E., *Engines of Discovery: A Century of Particle Accelerators* // *World Scientific, Hackensack, New Jersey*. 2008. 194 p.

Shiltsev V. *A phenomenological cost model for high energy particle accelerators* // *J. Instrum*. 2014. V. 9. T07002.

Seryi A., *Unifying Physics of Accelerators, Lasers and Plasma* // *CRC Press*. 2015. 288 p, 267 B/W Illustrations.

Автор благодарит М. Арена, Д. Денисова, П. Гарбинсуса, Х. О'Коннелла, Ц. Цина и Ф. Циммермана за их советы и полезные обсуждения при подготовке статьи

Мы и наши микробы

Ключевые слова: микробиом, резистом, болезнь Крона, метаболиты, ТФМ (трансплантация фекальной микробиоты).

Key words: microbiome, resistome, Crohn's disease, metabolites, TFM (transplantation of fecal microbiota)

Сама фраза «Мы и наши микробы» свидетельствует о сформировавшемся антропоцентрическом взгляде на микроскопических обитателей нашего тела – микробиоту. Однако микробиота представляет собой неотъемлемую часть нашего организма, развиваясь и функционируя как остальные органы и ткани. Недаром ученые говорят о «суперорганизме», или о том, что каждый из нас представляет собой сложную экосистему. Несмотря на годы изучения микробиоты, эта история далека от своего завершения. Количество непознанного и непонятого здесь существенно больше того, что удалось открыть, хотя уже полученные результаты потрясают

Американский профессор Джеффри Гордон, которого называют «отцом микробиома», в 2015 г. был номинирован на Нобелевскую премию за исследования взаимодействий бактерий кишечника с кишечной стенкой и организмом человека в целом, что говорит о серьезности научных результатов, получаемых в этой области. Так что же такое *микробиом* (микробиота), и почему так трудно определить, кто, как и с кем взаимодействует?

Поразительный факт: численность населяющих наше тело микроорганизмов (вирусов, бактерий, грибов), подавляющая часть которых обитает в желудочно-кишечном тракте, превышает общее число собственных клеток человека. Но самое удивительное – это разница в количестве генов, которые эти микроорганизмы несут: в среднем их в 500 раз больше, чем генов человека.

Микроорганизмы выполняют очень важные для нас функции, в том числе трофические и регуляторные. К примеру, кишечные бактерии разлагают неперева-ренные остатки пищи, выделяют в просвет кишечника различные соединения, включая витамины, ферменты и другие биологически активные вещества. Микроорганизмы активно участвуют в обменных процессах, в том числе в детоксикации, разлагая яды и токсины, поступающие с водой, пищей, воздухом и т. п.

Вся наша микробиота весит около 2 кг, что сопоставимо с такими крупными органами, как головной мозг или печень. Но в отличие от органов человека она очень плохо изучена, особенно с учетом того, как сильно микробиота варьирует от человека к человеку и у одного человека в зависимости от его состояния. И самое главное таинство – это то, как из нормального физиологического состояния она переходит в патологическое.



ГОВОРУН Вадим Маркович – академик РАН, профессор, доктор биологических наук, генеральный директор Федерального научно-клинического центра физико-химической медицины ФМБА России (Москва). Специалист в области молекулярной диагностики, геномики, протеомики и системной биологии. Автор и соавтор более 320 научных работ

Микробиотой называют совокупность всех микроорганизмов (вирусов, бактерий, грибов), населяющих тело человека. Резидентная, или облигатная, микробиота – это микроорганизмы, постоянно присутствующие в определенном отделе организма. Это сообщество, образовавшееся в процессе совместной эволюции микробов и макроорганизма, симбиотически связано с последним и часто выполняет защитную и другие полезные для него функции. Сама же микробиота таким образом обеспечивает себе устойчивые условия для существования. Наряду с резидентной существует и транзитная микробиота – это «посторонние» микроорганизмы, неспособные постоянно существовать в нашем теле.

Считается, что общее число микробных клеток в организме человека достигает 10^{14} , это на порядок превышает количество наших собственных клеток. Основная микробная популяция обитает в толстом кишечнике (более 500 видов), затем идет кожа (10^4 – 10^6 на $см^2$), конъюнктива глаза, верхние дыхательные пути и влагалище

© В. М. Говорун, 2020

Как полнеть «из воздуха»

В современную индустриальную эпоху некогда существовавшие микробные балансы человеческого организма повсеместно нарушаются. Это приводит не просто к дискомфорту, но и к ускоренному старению, развитию множества патологических состояний, и не только желудочно-кишечного тракта. Что до кишечника, то за последние полвека частота его заболеваний, в том числе онкологических, взрывообразно возросла, причем в развитых странах начинает лидировать рак толстой кишки. Добавьте к этому воспалительные заболевания, такие как колиты и болезнь Крона.

Налицо факт микробного дисбаланса, который присущ не отдельным индивидам, а целым популяциям. Парадокс: питаться люди стали, на первый взгляд, лучше и разнообразнее, но практически у каждого человека наблюдаются те или иные признаки пищеварительной дисфункции.

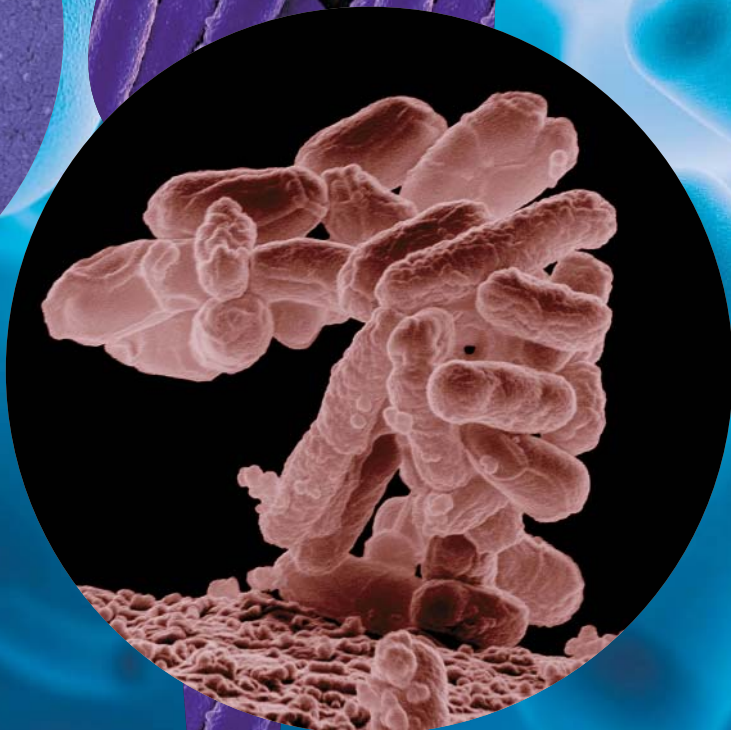
Оказывается, дело не всегда в том, какое количество пищи и даже калорий человек потребляет. Потому что

в зависимости от ферментативных свойств отдельных классов, родов и видов бактерий наша микробиота способна утилизировать даже те компоненты пищи, которые традиционно считались неперевариваемыми. Вспомним старую поговорку, что кто-то «полнеет прямо из воздуха». Это означает, что бактерии, извлекая такие дополнительные калории, делятся с организмом и запускают ряд процессов, приводящих к ожирению.

С точки зрения химика, ЖКТ – достаточно уникальная конструкция. Желудок и тонкий кишечник, запертые сфинктерами, представляют собой большие химические реакторы, где процесс пищеварения происходит с помощью ферментов, химических веществ и сильных детергентов, включая холевые кислоты, выделяемые с желчью. А благодаря кислотной среде желудка и отсутствию кислорода в тонком кишечнике там создаются относительно стерильные условия. На этой стадии из пищи извлекаются легкоусвояемые метаболиты: жиры, аминокислоты или короткие пептиды, а также «быстрые» углеводы.

<p>Ферментативная функция</p> <ul style="list-style-type: none"> • Расщепление белков, углеводов и жиров • Деконъюгация желчных кислот • Модификация холестерина • Участие в метаболизме производных щавелевой кислоты 	<p>Синтетическая функция</p> <ul style="list-style-type: none"> • Синтез витаминов К, С, группы В • Синтез никотиновой, фолиевой, пантотеновой, липоевой кислот • Синтез гормонов, ферментов • Синтез мочевой кислоты, незаменимых аминокислот • Синтез нейропептидов, противоопухолевых веществ и др. 	<p>Регуляция абсорбционной способности</p> <ul style="list-style-type: none"> • Выделение веществ, способствующих всасыванию воды, кальция, железа, витаминов D и E
<p>Защитная функция</p> <ul style="list-style-type: none"> • Бактериальный антагонизм • Синтез бактериоцинов (антимикробных соединений) • Синтез короткоцепочечных жирных кислот, обеспечивающих стабильность кишечного микробиома, и многоатомных спиртов 	<p>Регулирование иммунитета</p> <ul style="list-style-type: none"> • Стимуляция местного иммунитета • Стимуляция синтеза иммуноглобулинов, интерферона, интерлейкинов • Стимуляция фагоцитарной активности макрофагов 	<p>Детоксикационная функция</p> <ul style="list-style-type: none"> • Нейтрализация токсических субстратов и метаболитов (нитратов, гистамина, ксенобиотиков, мутагенных стероидов) • Стимуляция восстановления слизистой

Спектр функций нормального кишечного микробиома крайне широк – недаром его иногда выделяют в качестве отдельного органа человека. Соединения, вырабатываемые микроорганизмами, активно участвуют практически во всех метаболических процессах в организме человека. *По: (Полунина, 2018)*



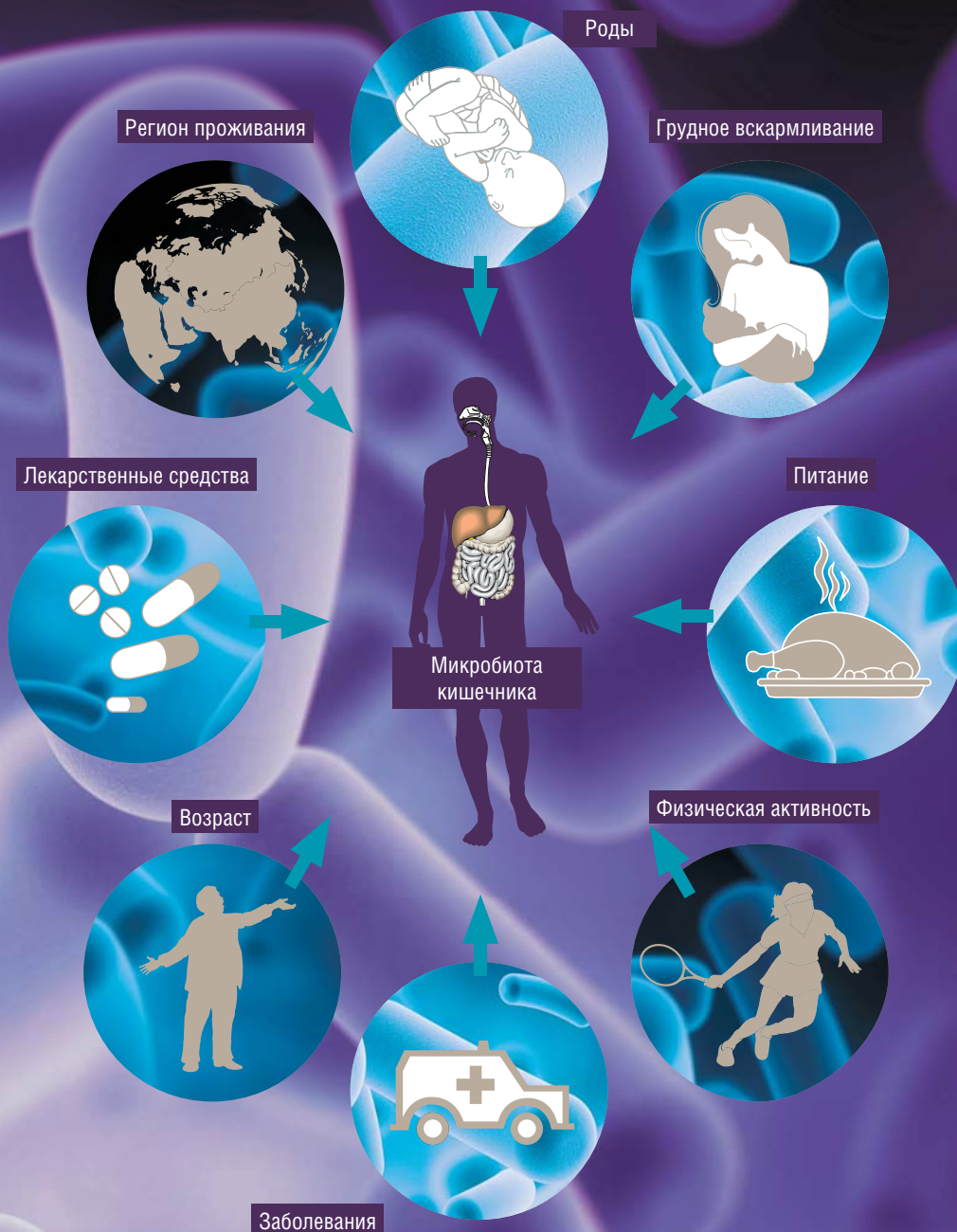
Кишечная палочка (*Escherichia coli*) – один из самых известных обитателей нижней части кишечника теплокровных животных. Большинство штаммов *E. coli* безвредны. В кишечнике эта бактерия синтезирует витамин К и предотвращает развитие патогенных микроорганизмов.

Фото CDC/Janice Haney Carr (вверху слева); NIAID/E. Erbe (справа)

Мечников считал, что раз в толстом кишечнике развиваются гнилостные процессы, приводящие к аутоинтоксикации организма, то его удаление позволит человеку жить дольше. Гипотеза о пользе резекции толстой кишки оказалась ложной (в то время не знали про все функции микробиты этого отдела ЖКТ). Однако придуманные для борьбы с гниением пробиотические препараты начали производить сначала в США, а потом и по всему миру. Так ошибка гения породила огромную индустрию

Верхние отделы ЖКТ слабо обсеменены бактериями, и это неслучайно. Кислотность, антибактериальные ферменты ротовой полости и некоторые иммунные факторы контролируют процесс размножения микроорганизмов настолько, чтобы справляться и с возможными гнилостными процессами в пище. Но если в районе тонкого кишечника численность микробов возрастает, это сопровождается патологическими реакциями. Бактерии не только поедают легкоусвояемые метаболиты, но и выделяют токсины, которые тотчас всасываются в кровь.

В толстый кишечник попадает уже то, что не переварилось. В нижних отделах тонкой кишки, в месте перехода в толстый кишечник, почти полностью реабсорбируется желчь – очень токсичный продукт для микроорганизмов. Поэтому в толстом кишечнике, где среда практически нейтральна и концентрация кислорода выше, выживают разнообразные бактерии, которые очень тонко и «интимно» кооперируются.



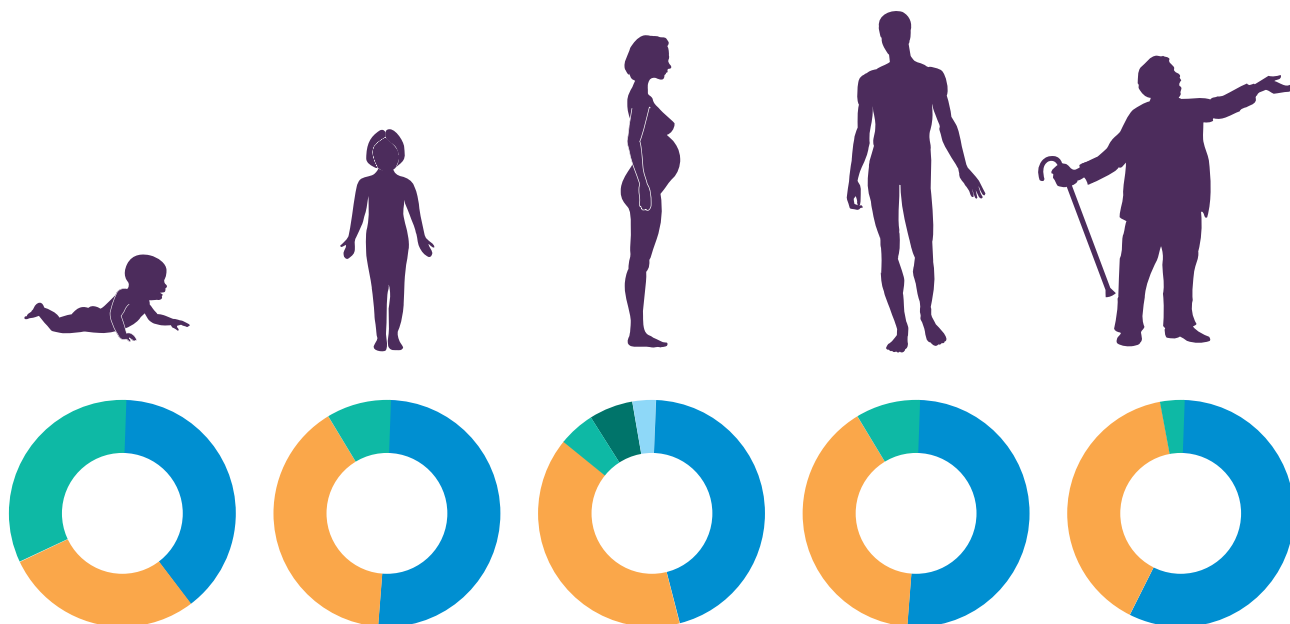
Существует множество факторов, определяющих состав и численность кишечного микробиома конкретного человека. Среди них можно выделить ключевые, связанные как с особенностями окружающей среды, так и с образом и историей жизни самого человека.

По: (Quigley, 2017)

Существует ли нормофлора?

В последние годы микробиота, обитающая на различных слизистых тканях человека, интенсивно исследуется как новая мишень для фармакологии. Поскольку медицина меняет свою философию, усиливая предсказательные и профилактические функции, кажется, что именно это новое биомедицинское направление позволит нам если не излечивать, то хотя бы предотвращать наступление тех или иных заболеваний.

Но чтобы направленно влиять на нашу микробиоту, мы должны сначала понять, что представляет собой «нормальная микрофлора». Понятие



В микробиом толстого кишечника могут входить сотни видов различных микроорганизмов, но у взрослого человека преобладают бактерии *Firmicutes* и *Bacteroidetes*. Разнообразие микроорганизмов с возрастом падает. Методом подсчета генов в микробных сообществах было показано, что пожилые люди имеют примерно в два раза меньше этих генов, чем молодые

- Бактероиды (наиболее типичные нормальные обитатели кишечника человека, составляющие около половины всей его микрофлоры)
- Фирмикуты (лактобактерии, стафилококки, стрептококки)
- Актинобактерии (бифидобактерии, коринебактерии)
- Протеобактерии (энтеробактерии)
- Другие

нормофлоры довольно иллюзорное. Можно считать, что у человека все в порядке, если он хорошо себя чувствует и его ничего не беспокоит с точки зрения пищеварения.

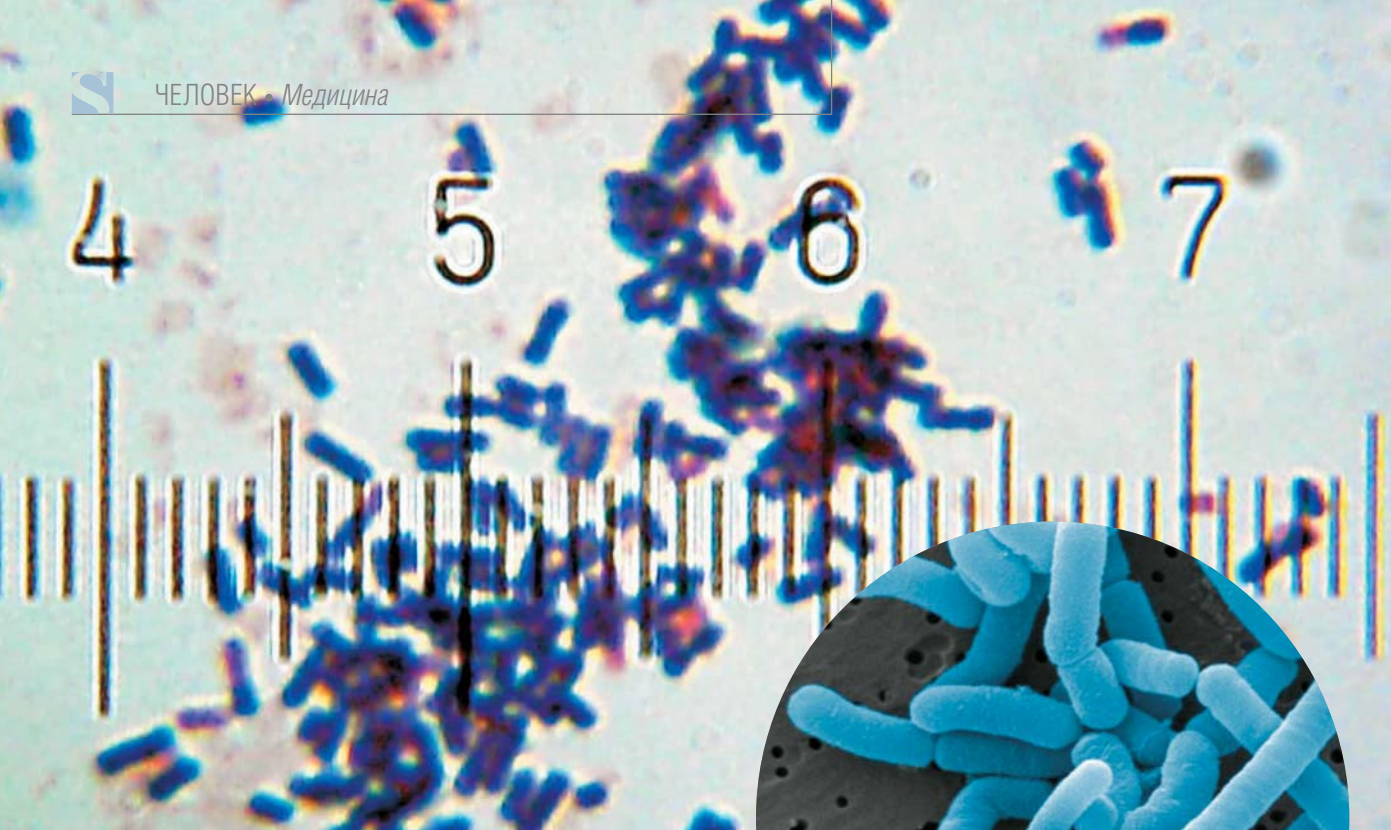
Если судить более глубоко, то нормофлора – это такое состояние триллионов клеток бактерий, при котором, во-первых, в организме не возникает воспалительной реакции. Во-вторых, спектр метаболитов, который микробиота продуцирует, достаточен для ее автономного существования в течение длительного времени без дополнительных бактериальных интервенций.

До сих пор идут споры: можно ли это микробиотное царство разбить на энтеротипы либо это некие динамические состояния, которые переходят одно в другое, не поддаваясь четкой классификации.

Вообще на микробное сообщество влияют многие факторы. В целом высокое разнообразие микробов и их генов в кишечнике – это хороший признак. С возрастом многообразие микробиоты падает. Подсчет генов в микробных сообществах показал, что их число у пожилых и больных людей падает примерно в два раза по сравнению со здоровыми и молодыми. И это приводит к развитию метаболического синдрома, диабета и других заболеваний.

В разных странах микробиота людей также имеет свои особенности. Но это вопрос контекста. Если, к примеру, взять города-миллионники в РФ и Европе, то никаких особенных отличий вы не обнаружите. А вот в глубинке, вдали от крупных городов, микробиота будет намного разнообразнее, напоминая микробные сообщества, характерные для людей, живших 100–150 лет назад. Это говорит о том, что, когда мы не потребляем много продуктов так называемого индустриального питания, наш микромир стремится к разнообразию.

На сегодня важно, что мы научились изменять бактериальную динамику, так как интерес представляет не только и не столько состав микробиома, сколько его реакции на наши активные действия, например когда мы путешествуем, меняем характер питания, попадаем в больницу и т. п. Ведь микробиота, как и клетки нашего организма, накапливает мутации. У нас это нередко заканчивается онкологическими трансформациями клеток, но понять, что происходит с микробиотой, пока не удастся. Так, известно, что уровень мутагенеза у бактерий коррелирует с частотой использования антибактериальных препаратов. И если посмотреть на антибактериальную политику в разных странах –



Лактобактерии используют при производстве молочнокислых продуктов, а также пробиотиков. Их численность у человека увеличивается во время грудного вскармливания. *Вверху* – *Lactobacillus acidophilus*, представители нормофлоры полости рта, толстой кишки и влагалища; *справа* – *L. paracasei*, обитающие в кишечнике и ротовой полости. Фото Bob Blaylock и Horst Neve (Max Rubner-Institut)

Китае, США, Европе – и на число мутаций, которые накапливаются в микробах, то мы увидим прямую, очень четкую связь.

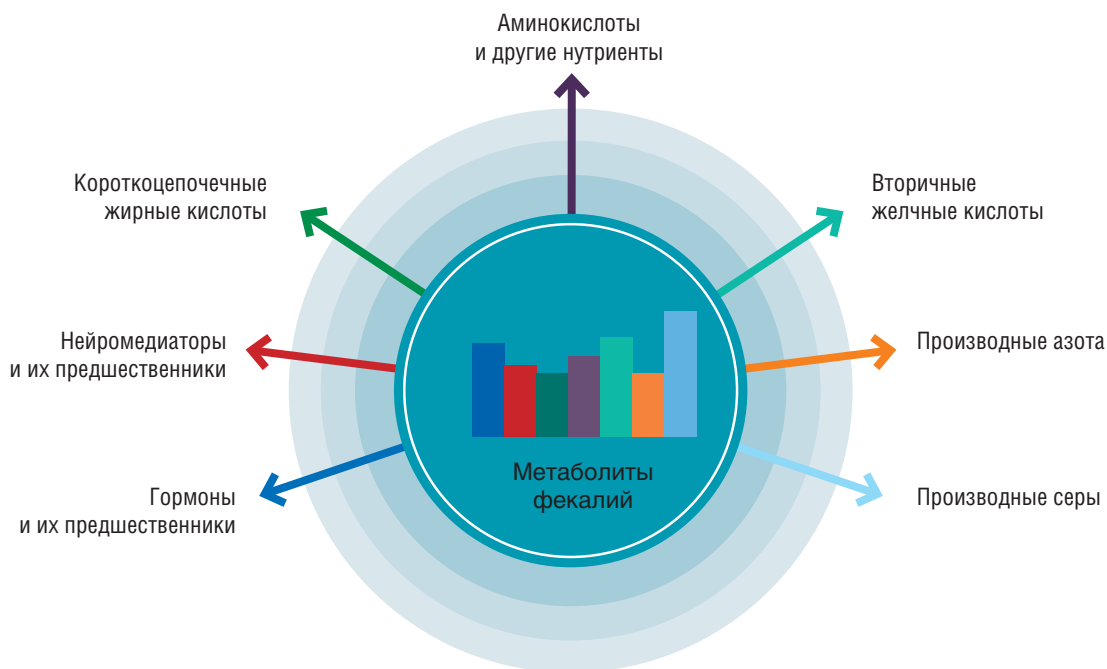
Сейчас ведутся метагеномные исследования по поиску закономерностей, связывающих присутствие в микробиоме тех или иных микроорганизмов с развитием заболеваний. К примеру, китайские исследователи показали связь между наличием определенных бактерий и формированием диабета 2-го типа. Но пока это лишь формальное описание феномена – сам механизм непонятен.

Нельзя забывать и об экологической составляющей микробиома. Ведь в природе синхронизируются потоки не только человеческих генов, передаваемых по наследству, но и бактериальных, которые передавались и передаются в популяциях людей как вертикально, так и горизонтально. К примеру, большинство млекопитающих являются *копрофагами*, это закрепленное поведение. Есть такой рефлекс и у приматов, и у людей, однако детей уже на ранних стадиях кормления от него отучают. С точки зрения санитарии это оправданно, с точки зрения бактериального переноса – не очень.

В «магазинных» продуктах содержится много генов *антибиотикорезистентности*, так как большинство сельскохозяйственных животных так или иначе контактирует с антибиотиками. Эти вещества используют для активации роста, снижения издержек от инфекционных заболеваний, что актуально, когда животных содержат скученно. И мы сами нередко применяем антибиотики при любых заболеваниях, а не только бактериальных.

В результате в среде происходит постепенное накопление генов устойчивости к антибиотикам. В одной из первых статей на эту тему было показано, что в почве содержится большинство современных, при этом не химически синтезированных антибактериальных соединений, которые являются природными средствами межбактериальной коммуникации.

Но самым гигантским резервуаром антибиотикоустойчивых генов сейчас является человечество. Многие инфекционные заболевания, такие как эмфизема легких, хронические пневмонии и бронхиты, которые ранее считались внутрибольничными инфекциями, – результат попадания в кровоток бактерий из их естественных «местообитаний» в нашем теле. Перемещаясь,



Метаболиты фекальных масс – это относительно простые вещества, которые синтезируются микроорганизмами кишечника (вторичные жирные кислоты, аммиак, оксиды азота, сероводород и др.) или поступают с пищей (аминокислоты и другие нутриенты). Всасываясь через кишечную стенку, метаболиты регулируют различные процессы в организме человека: пищеварение, сердечно-сосудистую и мышечную деятельность и даже когнитивные функции. Кроме того, метаболиты по принципу обратной связи регулируют состав микробиоты кишечника, активно влияют на состояние кишечной стенки и процессы воспаления. Метаболиты некоторых бактерий могут быть токсичны для человека (Levy, 2017; Cani, 2019 и др.). *Вверху в центре* – нормальное соотношение разных метаболитов в фекалиях человека

к примеру, из кишечника в легкие, такие микроорганизмы могут привести к болезни и даже гибели человека.

В идеале для смены курсовых комбинаций антибиотиков пациентам необходимо иметь карту их антибиотикорезистентности. Иначе, как и в других странах, у нас появятся *супербэги* – штаммы бактерий, нечувствительные к антибиотикам.

Покажите ваши метаболиты

Один из оптимальных способов оценки микробиоты – анализ спектров бактериальных метаболитов. Но и здесь не все так просто, так как последние представляют собой очень большую и плохо изведенную палитру.

Одна из проблем заключается в том, что нет надежных способов отличить эндогенные метаболиты, которые производятся клетками человека, от попадающих в организм с продуктами питания, водой, воздухом, а также созданных микроорганизмами. На животных это можно сделать с использованием радиоактивных или изотопных меток, на человеке – нет.

Но существуют группы метаболитов, которые можно рекомендовать для применения в медицинской практике. Прежде всего это *короткоцепочечные жирные кислоты*. Это рутинный анализ: сегодня их соотношение определяют у любого пациента с проблемами кишечника еще до постановки диагноза.

Вторая группа – *гормоноподобные вещества*, которые происходят из фолиевых кислот. В зависимости от спектра бактерий, которые окисляют либо продукты аддуктов фолиевой кислоты с глюкуроонидами, либо ее саму, могут образовываться активные соединения стероидного ряда, имеющие свои рецепторы на надпочечниках, перикарде, миокарде, легких и т.д. Однако эти вещества эндокринологи сейчас просто «не видят».

Третья группа – *индолы*, которые в зависимости от химической модификации могут либо оказывать защитное действие, подавляя опасные кишечные патогены, либо быть мощным модулятором противовоспалительных реакций.

Баланс всех этих веществ важен не только для назначения персонализированных схем лечения, но и для понимания, насколько хорошо удалось добиться

Какие существуют механизмы обратной связи между организмом и его микрофлорой? К примеру, когда вы садитесь на диету, ваши кишечные палочки секретируют пептиды, схожие с белковыми релизинг-факторами, которые выделяются в центральной нервной системе и служат для регуляции аппетита. Эти гормоноподобные бактериальные вещества, попадая в кровь, вызывают у вас чувство голода. Так бактерии «заставляют» вас их кормить.

Второй пример касается людей, которые обычно потребляют мало белков животного происхождения. Соответственно, у них будет недостаток пищеварительных ферментов, в частности протеаз и липаз в тонком кишечнике. Если таким людям на пикнике «налечь» на шашлык, то белковые тела попадут в толстый кишечник, где не могут быть использованы из-за отсутствия протеолитических ферментов. В результате в кишечнике запускаются интенсивные гнилостные процессы, вызванные бурным развитием анаэробных гнилостных бактерий. На следующее утро в результате аутоинтоксикации такие люди чувствуют себя как после тяжелого похмельного синдрома

конечного результата – надежной стабилизации физиологии пациента.

По-видимому, ученым и медикам предстоит большая работа по созданию ориентированной на медицину таблицы бактериальных метаболитов, разработке относительно дешевых методов их регистрации и понятных для врачей способов интерпретации. Другими словами, речь идет о выработке «показаний». И мерить метаболиты намного проще и правильнее, чем каждый раз определять состав микробиома (последнее гораздо важнее для фундаментальной науки, чем для практической медицины).

И снова дисбактериоз

В российской педиатрической практике до сих пор можно встретить диагноз «дисбактериоз», хотя в официальных международных классификациях болезней, например МКБ-10, такого заболевания не существует. В случае диареи или других кишечных проблем у ребенка берут кал на посев, бактериологическая лаборатория подсчитывает количество 20–30 микроорганизмов (бифидо-, лакто-, актинобактерий и др.). Главной целью этих анализов является установление наличия воспалительного синдрома в кишечнике. Но бывают случаи, когда анализ четко показывает дисбактериоз, а человек чувствует себя нормально, никаких клинических симптомов нет, и наоборот.

Само слово «дисбактериоз» не совсем правильное. Речь идет скорее о дисбалансе, который касается

не столько количественных характеристик бактерий, сколько большого числа метаболических параметров, включая содержание в кале коротких жирных кислот, индол, свободной ДНК человека (если есть диарея, т. е. воспалительный синдром, кишечный эпителий активно слущивается). И дисбаланс проявляется не только внутри кишечника, как раньше думали, – это системное заболевание.

Дисбаланс кишечной флоры связан с развитием онкологических заболеваний, различных форм воспалительных процессов, а также с инфекцией *клостридиями* (эти бактерии часто присутствуют в кишечнике в небольшом количестве, обычно не вызывая патологии). Как правило, клостридиальная инфекция является психогенной; этих тяжелых пациентов долго и массированно лечат антибактериальными средствами.

Когда увлекались секвенированием генов и поиском бактериальных ассоциаций, выяснилось, что с кишечной микробиотой каким-то образом связаны очень многие, самые разные болезни. Среди них – метаболический синдром, диабет 2-го типа, астма, аутизм. Известно, что подсадка мышам микробиоты пациента с аутизмом приводит к формированию сходного синдрома, который снимается пересадкой микробиоты здоровых доноров.

Болезнь Крона

Остановимся подробнее на *болезни Крона*, хроническом воспалительном заболевании кишечника. За последнее столетие эпидемиология этого тяжелого заболевания существенно изменилась в худшую сторону: от 2–3 случаев на 100 тыс. человек в начале прошлого века до 150, как в некоторых современных скандинавских странах. Причем в эту статистику вошли лишь случаи с яркой клинической картиной. В связи с развитием методов *капсульной эндоскопии*, которая дала возможность смотреть прямо в середину тонкой кишки, эта статистика, вероятно, еще больше изменится.

Попыток объяснить причины и механизм развития болезни Крона было много. Так, есть генетическая теория для случаев чисто аутоиммунного процесса. И сегодня мы уже можем достаточно аккуратно распознавать генетические паттерны, которые коррелируют с вероятностью развития этой болезни у конкретного человека.

Исторически болезнь Крона ассоциировали со многими инфекционными заболеваниями, например туберкулезом кишечника. Недавно французские специалисты при исследовании западноевропейской популяции обнаружили, что с болезнью Крона тесно ассоциирован специализированный штамм кишечной палочки LF82. Этот известный уропатогенный штамм вызывает циститы (воспаление мочевого пузыря)

Сигналы окружающей среды

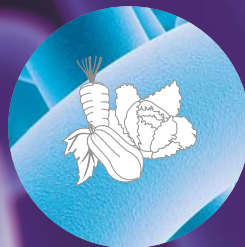
Питание



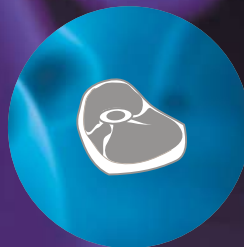
Антибиотики



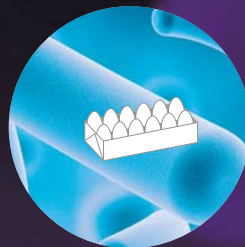
Температура



Пищевые
волокна



Животные
насыщенные жиры



Холестерин

МИКРОБИОТА

ДИСБАКТЕРИОЗ

МОЗГ:
аутизм
стресс
инсульт

ЛЕГКИЕ, СЕРДЦЕ,
СОСУДЫ:
аллергическая астма
атеросклероз
инфаркт

ПЕЧЕНЬ:
неалкогольная жировая
болезнь печени

КОЖА:
атопический дерматит

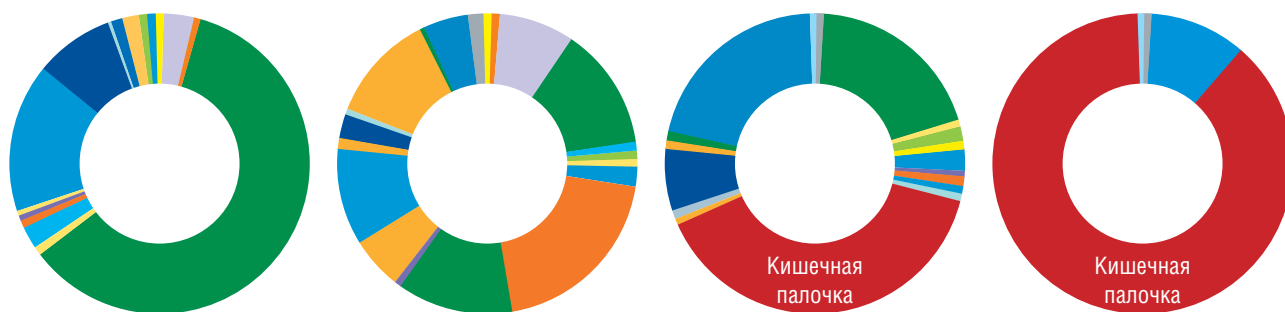
ЖИРОВАЯ ТКАНЬ:
воспаление
ожирение

ЖКТ:
болезнь Крона
язвенный колит

СИСТЕМНЫЕ
ЗАБОЛЕВАНИЯ:
диабет 2-го типа
красная волчанка

С дисбалансом кишечной микрофлоры связано развитие болезней не только желудочно-кишечного тракта, но и ряда других органов, а также системных и онкологических заболеваний и различных форм воспалительных процессов.
По: (Schroeder & Bäckhed, 2016)

Структура кишечного микробиома (доля разных видов)



Здоровые люди

Пациенты с болезнью Крона

Один из достоверных дисбалансов в микробиоте кишечника при болезни Крона связан с численностью кишечной палочки: у 30–60% таких больных содержание *E. coli* в кишечнике на один-два порядка выше, чем у здоровых. По: (Gevers et al., 2014)

и имеет склонность к повышенной адгезии и инвазии в клетки эпителия. Оказалось, что у некоторых пациентов с болезнью Крона эта кишечная палочка составляет до 80% микробных сообществ, окружающих язвы в тонком кишечнике (в норме эта концентрация не превышает 3%).

Казалось бы, если найден патоген, то можно как минимум продвинуться в лечении. Но, проведя филогенетический анализ, т. е. выделив и охарактеризовав штаммы у наших российских пациентов, мы поняли, что «наша» кишечная палочка отличается большим филогенетическим разнообразием и может принадлежать к обычной симбиотической флоре человека.

То, что мы обнаружили, является продолжением «философии контекстов». Во всех исследованных штаммах кишечной палочки у пациентов с болезнью Крона были найдены *опероны* (функциональные единицы генома у бактерий), связанные с утилизацией пропандиолов – продуктов распада фукозы, которая является частью защитной слизи, выделяемой слизистой оболочкой кишечника.

Алкоголизм можно рассматривать как болезнь: у алкоголиков снижено пищевое потребление, они являются истощенными людьми. Мы изучали, может ли изменение микробиоты быть у них очередным патогенетическим путем, усугубляющим течение заболевания, и действительно нашли некоторые закономерности. У алкоголиков, особенно при тяжелых состояниях, обнаружено много видов бактерий, «настроенных» на использование продуктов цикла метаболизма этанола. В целом разнообразие микробиоты у них снижено, при этом выявляются бактерии, отсутствующие в нормальных микробиомах

Эти и другие особенности бактерий кишечной палочки (например, присутствие генов, кодирующих железосодержащие белки-антиоксиданты) дают им преимущества относительно других штаммов микроорганизмов, находящихся в этот момент в кишечнике, что напоминает некоторые социальные модели развития человеческих обществ, когда скрытые группы людей при некоторых условиях становятся сильными и главными бенефициарами.

Речь идет о новой гипотезе, что кишечная палочка, не являясь в принципе патогеном, вызывающим конкретное заболевание, при развитии определенного сценария, связанного с применением антибиотиков, дисбактериозом, химическим отравлением или какими-то хроническими воспалительными процессами в слизистой, начинает получать все больше возможностей для размножения, ее численность становится подавляющей. Так начинается запуск патологического процесса.

Что такое ТФМ?

Наверное, далеко не все знают про процедуру *трансплантации фекальной микробиоты* (ТФМ). Не так давно американское Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов решило приостановить применение ТФМ в клинической практике, сославшись на два осложнения (одно со смертельным исходом) при пересадке кала. Причина – инфицирование пациентов штаммами кишечной палочки с генами множественной лекарственной устойчивости к антибиотикам.

Здесь нужно упомянуть, что в России смертельные осложнения от аппендицита составляют 1,5%, хотя его давно научились оперировать. Если взять все опубликованные протоколы ТФМ, то мы получим процент

Сенная палочка *Bacillus subtilis* в последние годы рассматривается как один из самых перспективных пробиотиков, который способствует усилению неспецифического и специфического иммунитета и стимулирует рост нормальной микробиоты кишечника (Савустьяненко, 2016).
Фото felixtsao

осложнений меньше 0,001%. К тому же это были пациенты после онкологических операций и химиотерапии, явно ослабленные. А, к примеру, наши коллеги из НИИ детской онкологии, гематологии и трансплантологии им. Р. М. Горбачевой (Санкт-Петербург) с помощью ТФМ спасают детей с острыми лейкозами, у которых главным осложнением лечения является сепсис. Использование ТФМ в такой безальтернативной ситуации, когда иммунной системы практически нет, а антибиотики не работают, может спасти до 60% пациентов.

Но, действительно, необходимо очень четко выработать показания к применению ТФМ. Все это вопрос контекста: если мы делаем процедуру, правильно оценив все балансы, существующие на данный момент у конкретного пациента, то имеем все шансы ему помочь.

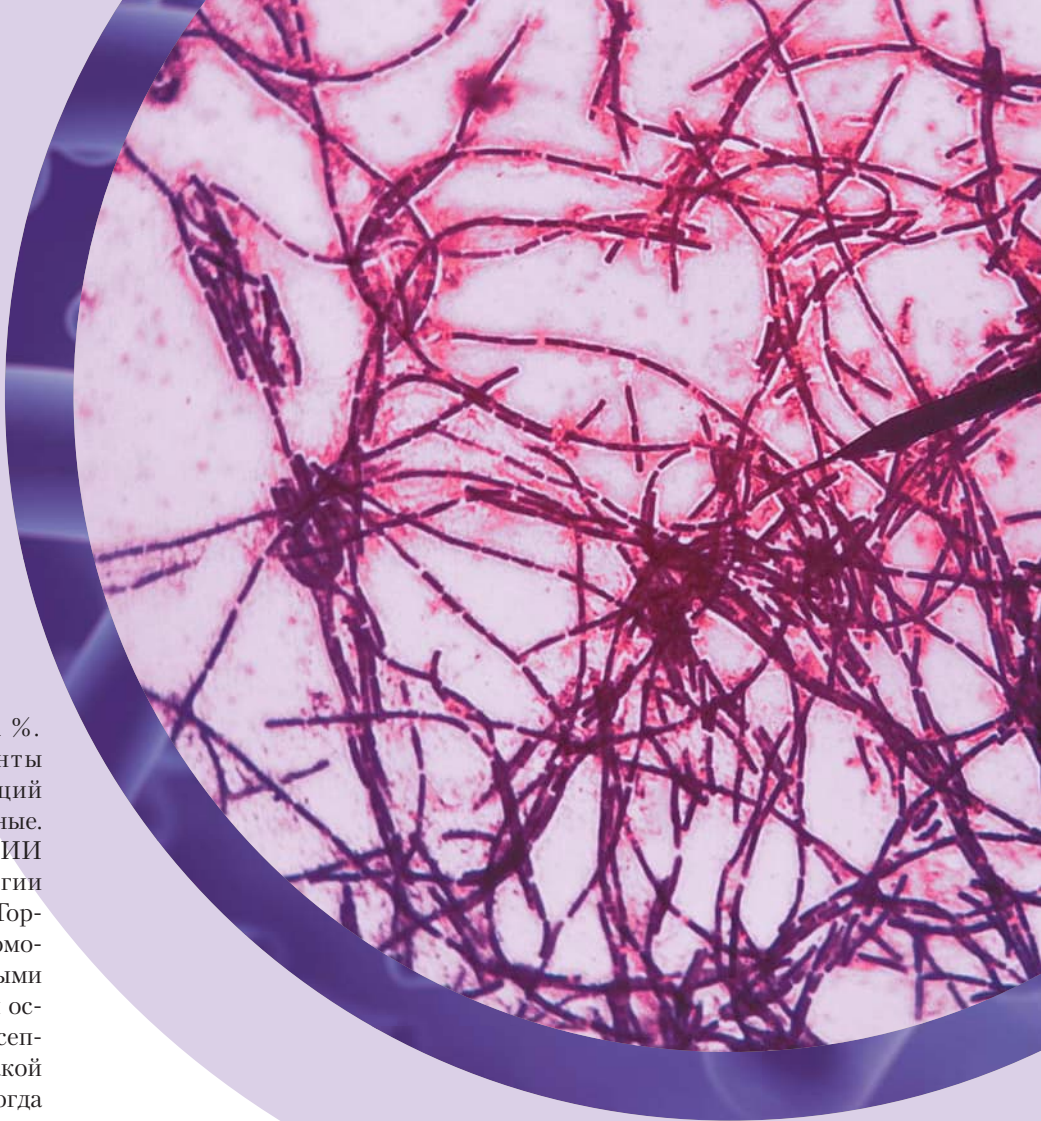
Манипуляция с микробиотой – это одно из направлений в персонализированной медицине. Так же как в случае применения таргетных препаратов, имеющих побочные действия, это должно быть очень обдуманым шагом. Оценить все возможные взаимоотношения между микробиотой и организмом практически невозможно: их настолько много, что они даже до конца не каталогизированы. Но вполне реально разработать так называемые

суррогатные оценочные приемы на основе метаболического профилирования, анализа воспаления, эндоскопических практик и определенных методов контроля.

Наши наблюдения за ТФМ и процессами заселения кишечника «чужими» бактериями показывают, что, как и в случае с группами крови, здесь также существуют подходящие к друг другу группы доноров и реципиентов. Поэтому даже успешная с точки зрения клиники процедура может дать только временный эффект, и пересаженная флора через какое-то время «уходит». Кстати сказать, сегодня ведутся работы и по созданию так называемого искусственного кала, или искусственной микробиоты, но пока не очень успешно.

Представление о том, что мы «не одиноки» на своем жизненном пути, возникло очень давно, но лишь в новом веке ученые и врачи получили в свои руки инструментарий, позволивший изучать сообщества наших микроскопических сожителей.

Сама проблема составления полного каталога всех микроорганизмов, населяющих организм человека, является в первую очередь технологической, так как лишь очень немногие из них поддаются выращиванию на искусственных питательных средах. Причин этому несколько. Ведь даже очень богатые среды могут не иметь каких-то компонентов, необходимых для жизненного цикла того или иного штамма. К тому же разные бактерии



обычно живут не одиночно, а составляют сообщество, поддерживая и дополняя друг друга.

Однако сейчас для того, чтобы узнать, есть ли те или иные виды бактерий в образце, достаточно выделить из него нуклеиновые кислоты, в первую очередь ДНК, и, «расшифровав» ее, сравнить с уже имеющимися базами данных. Удешевление этой процедуры позволило изучить то огромное разнообразие микроорганизмов, которые живут вместе с нами.

Наиболее сложным, но и, пожалуй, самым интересным объектом для изучения в этом смысле является кишечник. Его микробиом представляет собой очень сложную, иерархически организованную структуру. Ведь когда говорят о триллионах кишечных бактерий, то речь обычно идет о так называемой просветной флоре, той, что находится в просвете кишечника. Однако микроколонии бактерий живут и на самой слизистой – слое эпителиальных клеток, обращенных в просвет кишечника.

И здесь возникает множество вопросов. К примеру, как взаимодействуют между собой «просветные» и прикрепленные микроорганизмы, какова их роль в защите

нас от патогенов, регуляции иммунитета? На сегодняшний день далеко не на все эти вопросы есть внятный ответ. При этом изучение микроорганизмов, живущих в слизистой, очень важно, так как они более устойчивы к воздействию антибиотиков и, в случае наступления антибиотик-ассоциированной диареи, могут послужить базой для регенерации кишечного микробиома.

Проблема лекарственной устойчивости бактерий заслуживает особого внимания. Если вы используете антибиотики без рекомендации врача, то размножаете у себя пусть и дружественные бактерии, но с резистентностью к подобным лекарствам. И эта способность путем горизонтального переноса генов может передаваться другим, уже безвредным бактериям. Поэтому бесконтрольное использование антибиотиков, безусловно, влияет на скорость распространения в человеческой популяции резистентных штаммов.

Наука о микробиоте человека сейчас очень быстро развивается. Новые данные появляются с фантастической скоростью, и с каждым месяцем мы узнаем все больше о наших микроскопических симбионтах, во многом определяющих наше здоровье и саму жизнь.

Литература

Arumugam M., Raes J., Pelletier E. et al. Enterotypes of the human gut microbiome // *Nature*. 2011. V. 473. P. 174–180.

Arumugam M., Sunagawa S., Mitreva M. et al. Genomic variation landscape of the human gut microbiome // *Nature*. 2013. V. 493. P. 45–50.

Caesson M.J., Jeffery I. B., Conde S. et al. Gut microbiota composition correlates with diet and health in the elderly // *Nature*. 2012. V. 488. P. 178–184.

Dubinkina V.B., Tyakht A.V., Odintsova V.Y. et al. Links of gut microbiota composition with alcohol dependence syndrome and alcoholic liver disease // *Microbiome*. 2017. V. 5(1):141.

Huttenhower C., Gevers D., Knight R. et al. Human Microbiome Project Consortium. Structure, function and diversity of the healthy human microbiome // *Nature*. 2012. V. 486. P. 207–214.

Karlsson F.H., Fåk F., Nookaew I. et al. Symptomatic atherosclerosis is associated with an altered gut metagenome // *Nat. Commun*. 2012. V. 3:1245.

Lagier J.-C., Million M., Hugon P. et al. Human gut microbiota: repertoire and variations // *Front Cell Infect. Microbiol*. 2012. V. 2:136.

Ogorodova L.M., Fedosenko S.V., Popenko A.S. et al. Comparison Study of Oropharyngeal Microbiota in Case of Bronchial Asthma and Chronic Obstructive Pulmonary Disease in Different Severity Levels // *Vestn. Ross. Akad. Med. Nauk*. 2015. V. 6. P. 669–678.

Olekhovich E.I., Manolov A., Samoilo A.E. et al. Shifts in the Human Gut Microbiota Structure Caused by Quadruple *Helicobacter pylori* Eradication Therapy // *Front Microbiol*. 2019. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01902.

O’Hara A.M. & Shanahan F. The gut flora as a forgotten organ // *EMBO Rep*. 2006. V. 7. P. 688–693.

Petrov V.A., Saltykova I., Zhukova I.A. et al. Analysis of Gut Microbiota in Patients with Parkinson’s Disease // *Bull. Exp. Bio. I Med*. 2017. V. 162(6). P. 734–737.

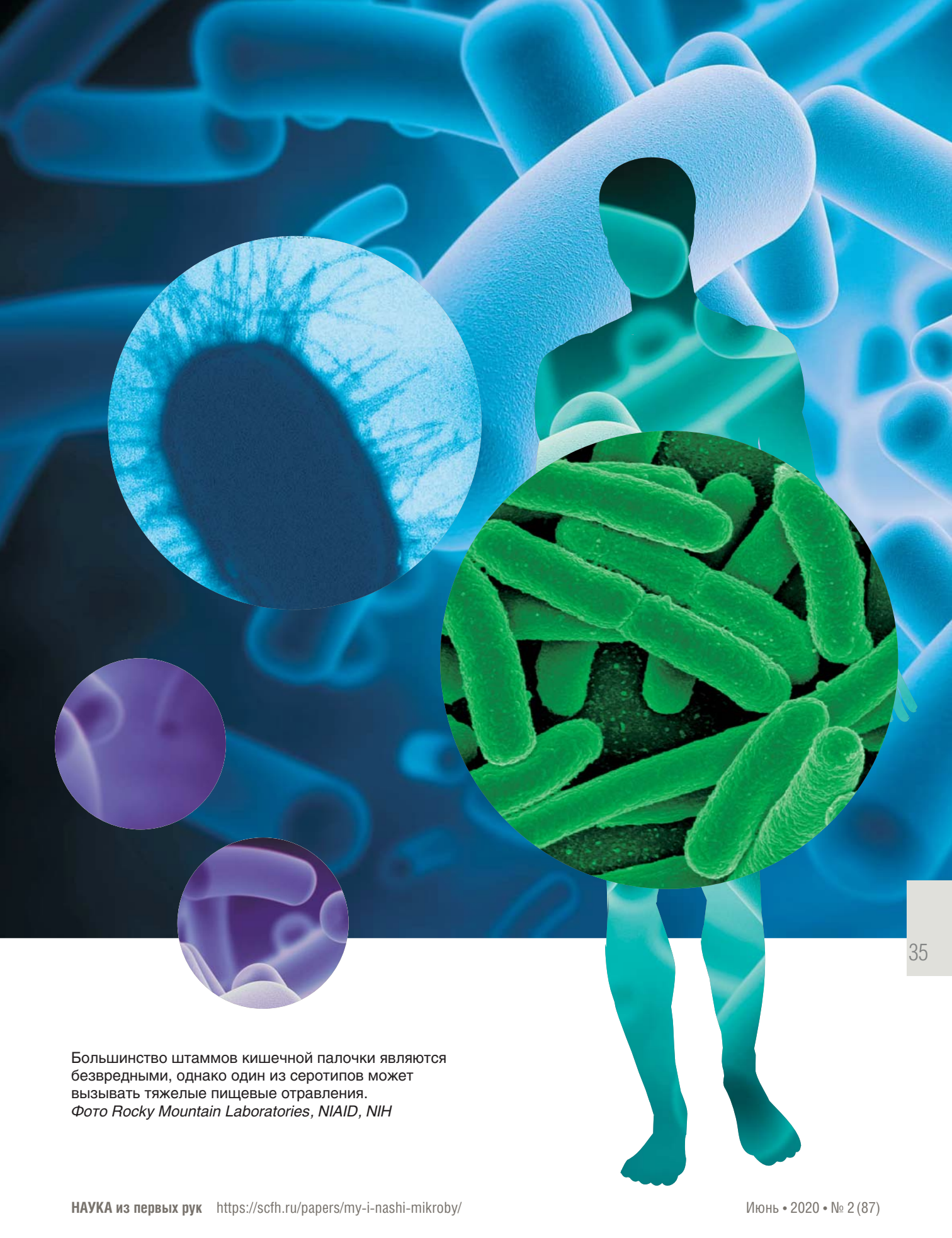
Qin J., Li Y., Cai Z. et al. A metagenome-wide association study of gut microbiota in type 2 diabetes // *Nature*. 2012. V. 490. P. 55–60.

Tyakht A.V., Kostryukova E., Popenko A. S. et al. Human gut microbiota community structures in urban and rural populations in Russia // *Nat. Commun*. 2013. V. 4:2469.

Tyakht A.V., Manolov A., Kanygina A.V. et al. Genetic diversity of *Escherichia coli* in gut microbiota of patients with Crohn’s disease discovered using metagenomic and genomic analyses // *BMC Genomics*. 2018. V. 19(1):968.

Wu G.D., Chen J., Hoffmann C. et al. Linking long-term dietary patterns with gut microbial enterotypes // *Science*. 2011. V. 334. P. 105–108.

Yatsunenkov T., Rey F.E., Manary M.J. et al. Human gut microbiome viewed across age and geography // *Nature*. 2012. V. 486. P. 222–227.



Большинство штаммов кишечной палочки являются безвредными, однако один из серотипов может вызывать тяжелые пищевые отравления.

Фото Rocky Mountain Laboratories, NIAID, NIH

Сахарный диабет —

Эволюционная ловушка?





Сегодня 10 % всех расходов на здравоохранение тратится на борьбу с сахарным диабетом – эта цифра говорит сама за себя. По данным Международной федерации диабета (IDF), которая каждые два года делает эпидемиологический срез ситуации и дает прогноз на будущее, этой болезнью сегодня страдает каждый одиннадцатый взрослый человек (при этом половина случаев вообще не диагностирована), а каждый тринадцатый входит в группу риска. По прогнозам экспертов, уже к 2025 г. число больных сахарным диабетом в мире достигнет 700 млн человек, и каждому четвертому взрослому во многих странах мира придется жить с этим заболеванием

*Диабет – состояние, не очень частое среди людей,
при котором плоть и конечности «тают» и превращаются в мочу...
Если превращение быстрое, вскоре наступает смерть.
Жизнь с диабетом ужасна и отвратительна...*

Аретей Каппадокийский.
Лечение хронических болезней

Число больных сахарным диабетом с 2000 г., т.е. за последние 20 лет, выросло в три раза, и прогнозы, которые каждые два года дают специалисты, становятся все более угрожающими. Ситуация странная: на фоне успехов в борьбе с сердечно-сосудистыми и инфекционными болезнями сахарный диабет продолжает распространяться угрожающими темпами.

Как же могло случиться, что это некогда редкое неинфекционное заболевание в современном мире распространяется со скоростью эпидемии? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно обратиться к генетическим, эволюционным и другим факторам, которые могли повлиять на развитие этой на первый взгляд парадоксальной ситуации.

Во всем виноват инсулин?

Сахарный диабет, согласно определению ВОЗ, – это группа метаболических (обменных) заболеваний, характеризующихся *гипергликемией*, повышением содержания сахара в крови. Причина этого явления кроется в изменении уровня секреции и/или эффективности действия *инсулина* – пептидного гормона, вырабатываемого поджелудочной железой. Как мы видим, ключевое слово здесь – инсулин.

Долгое время считалось, что инсулин – это уникальный гормон, который есть только у млекопитающих. Потом выяснилось, что инсулин или подобные ему молекулы имеются практически у всех позвоночных животных, а к концу прошлого века стало понятно, что они есть и у беспозвоночных, таких как черви и моллюски. Другое дело, что в ходе эволюции функции этих пептидов сильно изменились.

КЛИМОНТОВ Вадим Валерьевич – доктор медицинских наук, профессор РАН, заместитель руководителя филиала по научной работе и заведующий лабораторией эндокринологии Института клинической и экспериментальной лимфологии – филиала ИЦиГ СО РАН (Новосибирск), член Европейской ассоциации по изучению сахарного диабета. Автор и соавтор 380 научных работ, в том числе 3 монографий

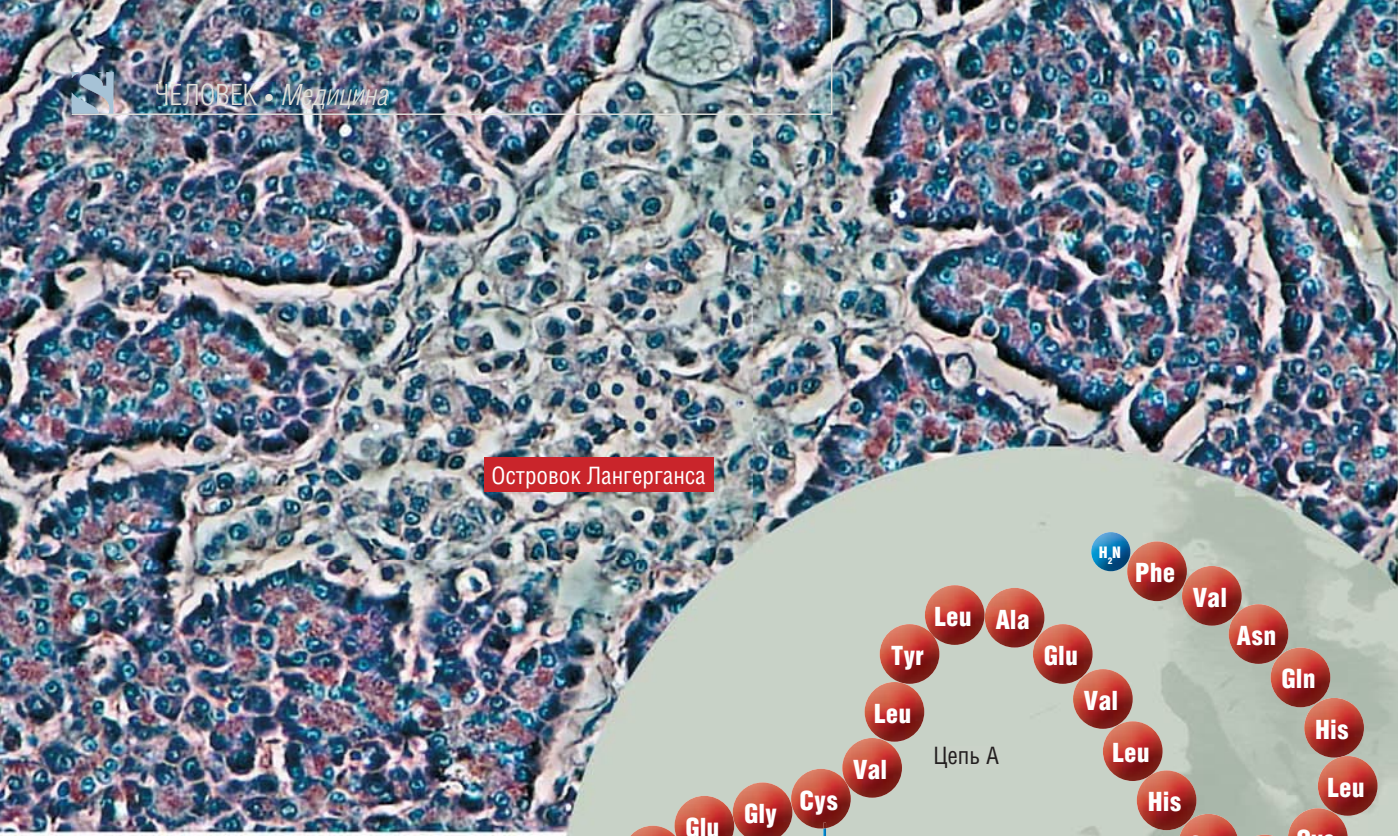
Само слово «диабет» известно уже более 2 тыс. лет, оно древнегреческого происхождения и обозначает состояние, связанное с «прохождением насквозь», вроде прохождения воды по сифону. Считается, что этот термин придумал выдающийся древнеримский врач и философ Аретей Каппадокийский, хотя на самом деле он просто дал первое подробное описание этой болезни.

По его словам, «диабет – это состояние, не очень частое среди людей, при котором плоть и конечности «тают» и превращаются в мочу. Если таяние быстрое, вскоре наступает смерть». С позиций сегодняшнего дня можно отметить, как правильно античный врач подметил основные симптомы болезни, в том числе ее сущность – «растворение плоти конечностей», связанной с дефицитом универсального анаболика инсулина и гиперкатаболическим синдромом

Ключевые слова: сахарный диабет, ожирение, инсулин, инсулинорезистентность, эволюция, генные сети.

Key words: diabetes, obesity, insulin, insulin resistance, evolution, gene networks

© В. В. Климонтов, 2020



Островок Лангерганса



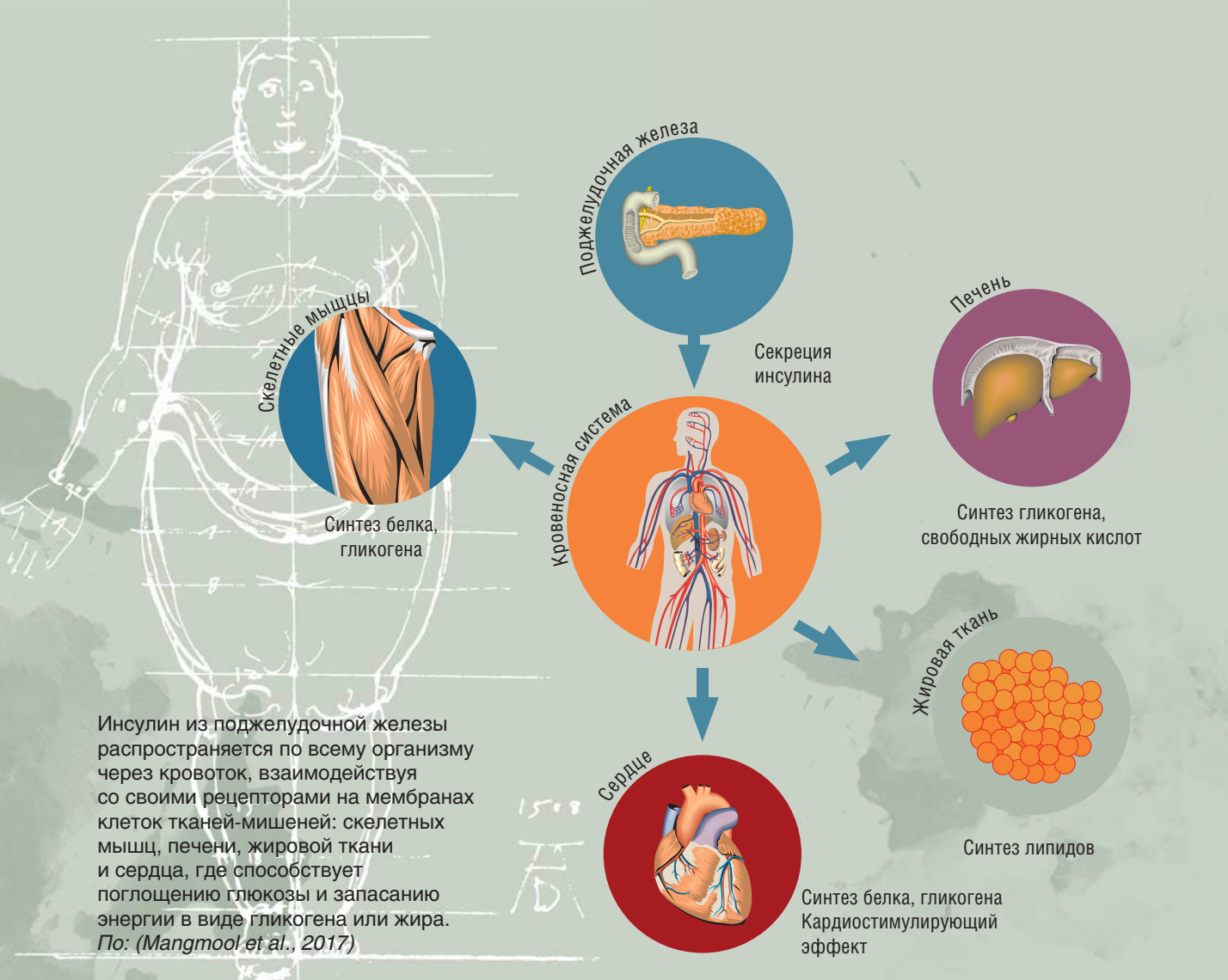
Первая инъекция инсулина была сделана почти сто лет назад – в январе 1922 г. Таким образом молодой канадский ученый Ф. Бантинг спас жизнь мальчику, больному сахарным диабетом, с помощью очищенного экстракта, полученного из поджелудочной железы. Открытие инсулина в 1921 г. было признано величайшим достижением XX в., а сам Бантинг был удостоен Нобелевской премии совместно с Дж. Маклеодом, который впервые предположил, что причиной диабета может быть нарушение в работе поджелудочной железы, а впоследствии предоставил Бантингу свою лабораторию и помощь. Инсулин, получаемый из поджелудочной железы разных животных, сразу вошел в клиническую практику – с его помощью были спасены миллионы больных диабетом. Первый искусственный синтез инсулина был проведен в начале 1960-х гг., а в 1978 г. был получен первый генно-инженерный человеческий инсулин. Для производства такого рекомбинантного инсулина используют пекарские дрожжи и кишечную палочку

Молекула гормона инсулина образована двумя полипептидными цепями, А и В, которые соединены дисульфидными мостиками (S-S). Первичная структура инсулина у разных видов различается. К человеческому наиболее близок инсулин свиньи, который отличается всего одним аминокислотным остатком, а также быка. ©CC BY 2.0, рис. Zappys Technology Solutions

Вырабатывается инсулин бета-клетками островков Лангерганса поджелудочной железы (фото вверху). Public domain

У более примитивных организмов инсулиноподобные субстанции в основном играют роль факторов роста. У человека также имеются *инсулиноподобные факторы роста*: ИФР-1 и ИФР-2. Но в ходе эволюции функции инсулина и инсулиноподобных пептидов разошлись, произошла их специализация. И чем выше тот или иной организм стоит на эволюционной лестнице, тем большее значение для него имеет *метаболическая функция* инсулина, которая у высших животных и человека стала основной.

Что же это за функция? Не вдаваясь в подробности, можно сказать,



что инсулин нужен, чтобы депонировать избытки энергетических субстратов, т.е. способствовать синтезу жира, белка, а также сложных углеводов в виде животного «крахмала» – полисахарида *гликогена*. Другими словами, инсулин является универсальным анаболиком, усиливающим процессы обмена, направленные на синтез высокомолекулярных соединений. А вот обратные *катаболические* функции (расщепление жира, образование глюкозы из неуглеводных соединений, распад гликогена) этот гормон тормозит. Поскольку инсулин вырабатывается после еды, его задача – «запасти» то, что поступило с едой, чтобы использовать запасы в «голодное» время.

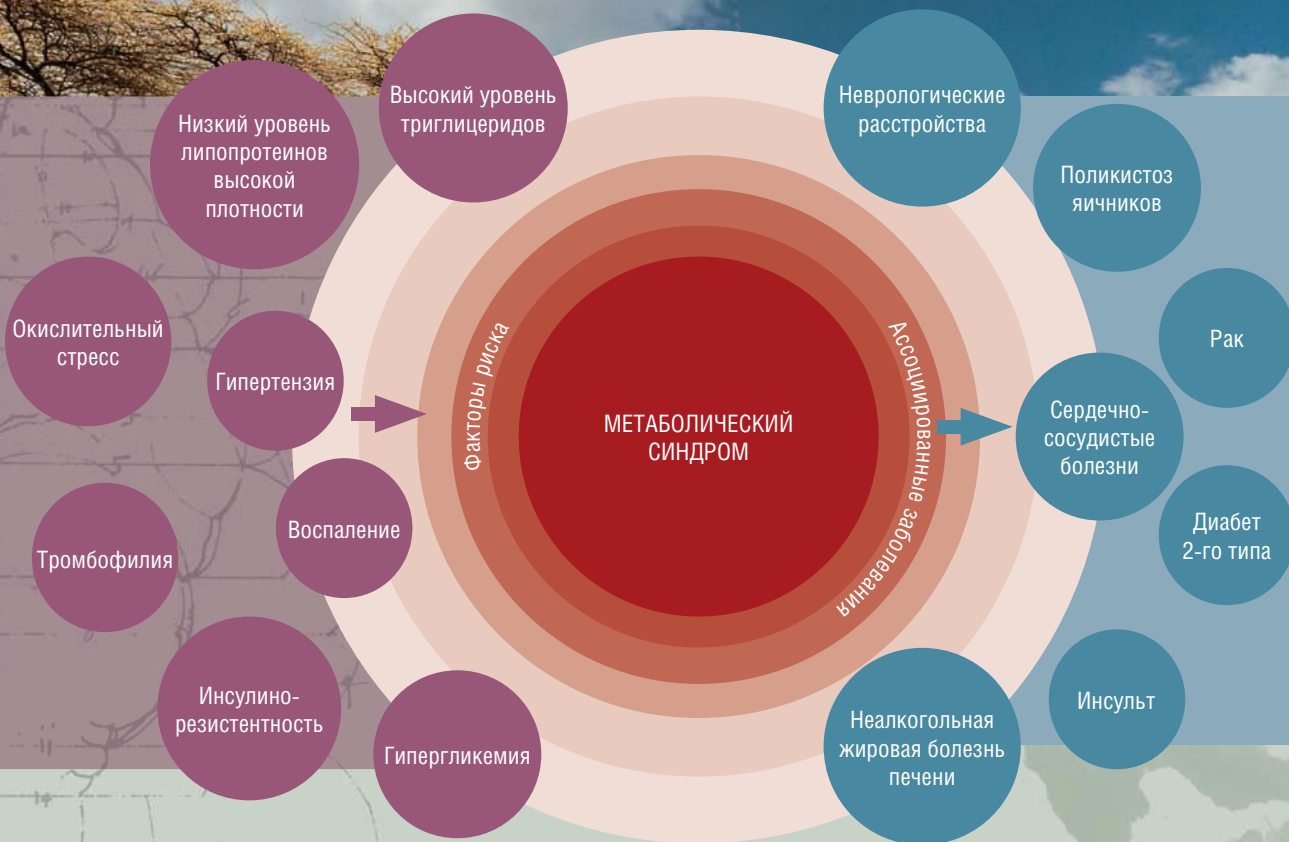
Механизм развития *сахарного диабета 2-го типа*, который вносит основной вклад в современную эпидемию заболевания, связан с двумя негативными факторами: нарушением чувствительности клеток к инсулину и дисфункцией *бета*-клеток поджелудочной железы, вырабатывающих этот гормон.

Долгое время считалось, что первопричиной является именно *инсулинорезистентность* клеток. Когда чувствительность к инсулину падает, *бета*-клетки

поджелудочной железы начинают синтезировать большое количество этого гормона. Лишь спустя какое-то время наступает декомпенсация – развивается сахарный диабет. Насколько это предположение верно, трудно сказать. Здесь надо принять во внимание, что число людей с инсулинорезистентностью гораздо больше, чем больных сахарным диабетом. Внешним выражением снижения чувствительности к инсулину может служить так называемое *абдоминальное ожирение*, когда окружность талии больше окружности бедер.

Концепция инсулинорезистентности, больше известная под именем *метаболического синдрома*, в последние 30 лет является одной из самых популярных в медицине. Термином «метаболический синдром» обозначают целый кластер факторов риска, который включает, помимо абдоминального ожирения, сердечно-сосудистые заболевания, артериальную гипертензию, нарушения липидного и углеводного обмена и др., т.е. именно те патологии, которые во многом определяют структуру смертности современных людей.

К сожалению, эту, безусловно, красивую и нужную концепцию нельзя назвать полностью подтвержденной,



В центре концепции метаболического синдрома стоит инсулинорезистентность клеток. С этим синдромом связаны основные патологии, определяющие смертность у современного человека. По: (Mendrick et al., 2017)

так как нет четких доказательств, что именно инсулинорезистентность, которая стоит в ее центре, является определяющим звеном. Неудивительно, что многие специалисты считают, что метаболического синдрома в природе не существует. Но в любом случае несомненен тот факт, что снижение чувствительности к инсулину, ассоциированное с повышением его уровня в крови, тесно связано с основными факторами риска для здоровья современного человека.

Гены диабета В КОНТЕКСТЕ ЭВОЛЮЦИИ

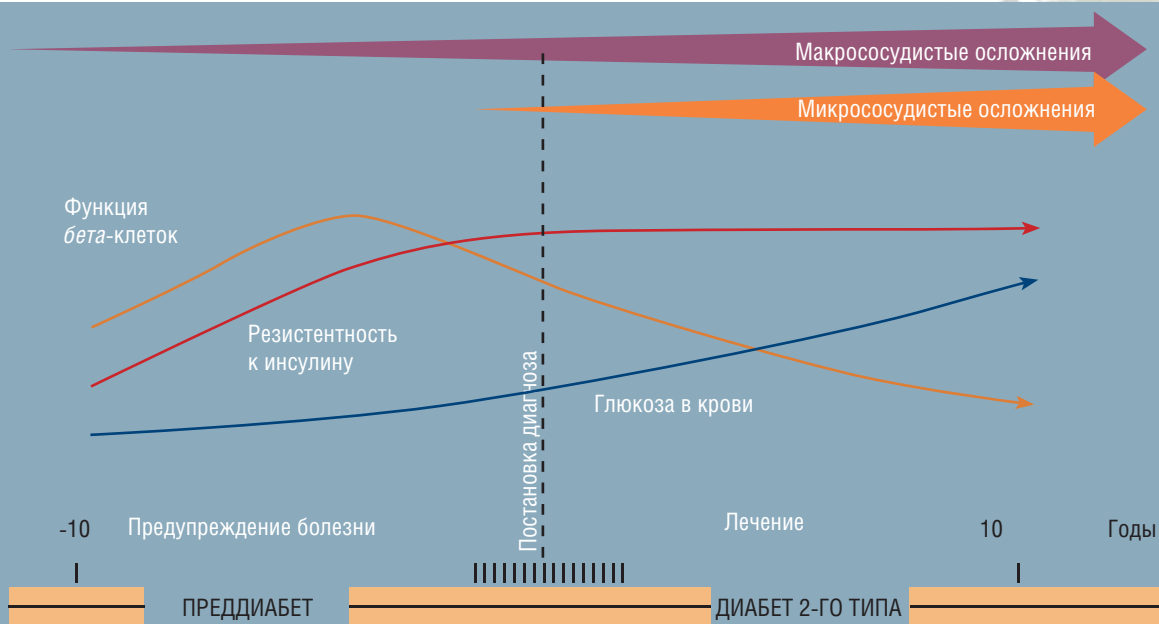
Про молекулярную генетику диабета мы почти ничего не знали до 2000 г.: к тому времени было известно лишь несколько генных *полиморфизмов* (вариаций), связанных с этой болезнью. Когда же начались полногеномные исследования, то их результаты оказались неожиданными и даже шокирующими.

Во-первых, было идентифицировано несколько десятков разных генов, ассоциированных с развитием

диабета, которые раньше даже не рассматривались как возможные «кандидаты»: о роли многих из них до этого практически ничего не знали. Во-вторых, оказалось, что каждый такой ген вносит очень малый вклад в патогенез заболевания. Последнее стало большим разочарованием: не оправдались надежды, что использование генного анализа станет удобным инструментом для персонализированной профилактики сахарного диабета. Выяснилось, чтобы дать прогноз развития сахарного диабета у конкретного пациента, намного дешевле и проще померить окружность его талии и узнать, чем болеют родители.

Но все это было лишь началом истории о молекулярных основах развития сахарного диабета. В процессе дальнейшего изучения стало понятно, что «выдергивать» отдельные гены из общей картины бессмысленно – нужно слушать весь «оркестр».

На помощь пришли биоинформатики, которые с помощью компьютерного моделирования стали изучать сигнальные пути, лежащие в основе патогенеза заболевания. К примеру, группа специалистов



Стадии прогрессирования сахарного диабета 2-го типа сопровождаются гипергликемией, снижением выработки инсулина и повышением устойчивости клеток к этому гормону.
По: (DeFronzo, 2004)

из новосибирского Института цитологии и генетики СО РАН при изучении генных сетей транскрипционной регуляции, которые лежат в основе сахарного диабета, выявили ключевые факторы, вовлеченные в дифференцировку *бета*-клеток поджелудочной железы и клеток жировой ткани (Лашин и др., 2019).

Факт, что большая часть этих генов так или иначе оказалась связанной с *бета*-клетками, а не с чувствительностью к инсулину, стал неожиданным. Где же тогда «гены инсулинорезистентности»? Если это свойство – эволюционное приобретение, то как оно могло возникнуть, почему получило такое широкое распространение?

Совместив полученную генную сеть с «относительными возрастными» каждого гена, удалось выяснить, что мы имеем дело с древней системой регуляции, которая формировалась в процессе развития живого. Другими словами, в основе сахарного диабета 2-го типа лежат группы очень «древних» генов, возникших на ранних этапах эволюции. Эволюционно сахарный диабет оказался близок к другим патологиям, связанным с нарушениями энергетического обмена в клетке: болезнью Альцгеймера и Паркинсона.

С наиболее «древними» генами оказалась ассоциирована и моногенная форма сахарного диабета,

известная как *диабет взрослого типа у молодых* (англ. MODY, *maturity-onset diabetes of the young*), но в данном случае речь идет о достаточно «грубых» генетических поломках. Диабет типа MODY развивается у детей и подростков, по клиническому течению он напоминает скорее диабет 2-го типа, но «спущенный» в детский возраст, тогда как обычно эта болезнь развивается после 30–40 лет.

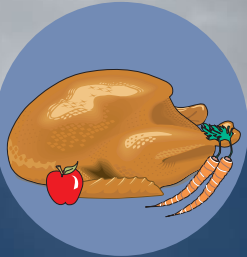
Особняком стоит *диабет 1-го типа*, который является аутоиммунным заболеванием. Его патогенез ассоциирован с другими, более «молодыми» генами.

Эволюция человека: адаптивная инсулинорезистентность?

Тот факт, что в основе сахарного диабета 2-го типа лежат генетически закрепленные механизмы, заставляет нас обратить внимание на более поздние этапы эволюции, в первую очередь на то, как обстояли дела с энергетическим обменом в истории гоминид.

Как известно, эволюционные линии человека и нашего ближайшего «родственника» – шимпанзе – разошлись около 6 млн лет назад. Какие же изменения произошли в условиях жизни и питания наших предшественников, заложившие основы для развития таких «болезней цивилизации», как сахарный диабет?

Начнем с *австралопитека* (*Australopithecus*), образ жизни которого был характерен для высших приматов. Питание этого гоминида было преимущественно углеводным (листья, травы, фрукты), при этом ему приходилось потреблять большие объемы низкокалорийной



Человек прямоходящий.
Объем мозга 850–1200 см³.
Музей Naturalis
(Лейден, Нидерланды).
Фото Х. Кранена.
©CC BY 4.0



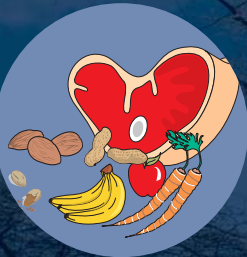
300 тыс. ? лет

1,8 млн—140 тыс. ? лет

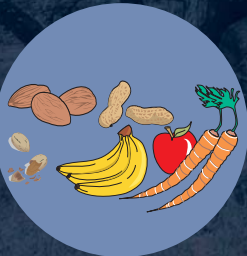
1,8—1,5 млн лет

2,8—2,5 млн лет

3,5—2,4 млн лет



Человек умелый
(*Homo habilis*).
Объем мозга 650 см³.
Музей эволюции человека
(Бургос, Испания).
Скульптор Э. Дейнс.
©CC BY-SA 4.0



Человек разумный
(*Homo sapiens*).
Объем мозга
1440 см³.
«Галерея
де Ауриньякен»
(Каверн-дю-Пон-
д'Арк, Франция).
Фото Sémhur.
©CC BY-SA 4.0



Человек
работающий
(*Homo ergaster*).
Объем мозга
880 см³. Музей
эволюции
человека
(Бургос, Испания).
Фото Х. Кабана.
©CC BY-SA 4.0



Австралопитек
африканский
(*Australopithecus
africanus*) из Южной
Африки. Объем
мозга 440 см³.
Скульптор Э. Дейнс
(Париж, Франция).
Фото Nachosan.
©CC BY 4.0

В процессе эволюции человека условия его жизни и питания радикально поменялись

пищи, чтобы получить необходимую для жизни энергию. Объем мозга австралопитека составлял всего 440 см³, и шедевры его творческой активности до нас не дошли, очевидно, потому, что они и вовсе не существовали.

У человека умелого (*Homo habilis*) объем мозга составлял уже примерно 650 см³. В его пище, предположительно, появлялось все больше животного белка и жира, иначе ему было бы трудно развить такую энергетически «затратную» структуру, как головной мозг. Питание человека работающего (*Homo ergaster*), жившего 1,8–1,5 млн лет назад, стало еще более калорийным, в том числе за счет охотничьей добычи. Как результат – увеличился размер тела и примерно в два раза мозга.

Похожие тенденции в питании прослеживаются у человека прямоходящего (*Homo erectus*). Мы пока не очень понимаем (данные палеогенетики в этом плане скромны), как в этот период шел отбор генов, ассоциированных с диабетом. Но очевидно, что требования к бета-клеткам поджелудочной железы стали повышаться, так как высококалорийная еда требовала большого количества инсулина, и этот гормон начал играть все большую роль в энергетическом обмене.

У человека разумного (*Homo sapiens*) головной мозг стал еще больше. По современным оценкам, этот главный орган человека в состоянии натошак потребляет до 40–45% всей вырабатываемой в организме энергии, а в целом эта цифра составляет 20–30%. И здесь возникает вопрос: как могла эволюция пойти по пути создания такой энергетически несовершенной структуры, которая к тому же потребляет эту энергию в рафинированном виде, т. е. в виде глюкозы? Очевидно, что в данном случае речь может идти о конкретной адаптации к меняющимся условиям среды.

Есть гипотеза, что инсулинорезистентность – это и есть тот механизм, который позволил нашему головному мозгу развиваться и увеличиваться в объеме. Ведь жизнь предков человека была сложной: то голод, то эпидемии. Известно, что в этих ситуациях снижается чувствительность к инсулину клеток мышц, печени, жировой ткани и других периферических органов – все они могут «потерпеть», в отличие от головного мозга. Другими словами, мы имеем дело с эволюционно закрепленным защитным механизмом, который нужен для выживания в экстремальной ситуации.

Косвенно в пользу этого предположения говорят результаты исследования, проведенного на Ямайке на взрослых людях, которые до рождения и в раннем детстве перенесли *маразм* – состояние глубокой энергетической недостаточности (Francis-Emmanuel *et al.*, 2014). Эти люди оказались менее чувствительными к инсулину, у них обнаружили больше нарушений углеводного обмена и случаев сахарного диабета. Обычно такие изменения объясняют тем, что при

недостатке энергетических субстратов нарушается «закладка» бета-клеток. Но ведь на это можно посмотреть и по-другому: возможно, эти люди выжили, так как изначально были менее чувствительны к инсулину, что дало их мозгу возможность развиваться.

Правда, вопрос, в какой мере инсулинорезистентность на самом деле способствовала развитию мозга гоминид, пока остается открытым. Кстати сказать, инсулин – это не только гормон, улучшающий утилизацию глюкозы. Он также синтезируется в ряде нейронов и стимулирует когнитивные функции (память, мышление). Это неплохо укладывается в эволюционную стратегию перехода от «сильного» к «умному», которая, как предполагают, определила превосходство человека над другими представителями животного царства, в частности над себе подобными.

Еще одна интересная сторона проблемы: инсулинорезистентность (по крайней мере, у мужчин) зависит и от снижения уровня полового гормона *тестостерона*, тесно связанного с агрессивностью. Так что снижение устойчивости к инсулину могло в какой-то мере способствовать развитию более сложной социальной организации у наших предков.

Предполагают, что более сложные социальные взаимодействия сыграли решающую роль в эволюционной «победе» *Homo sapiens* над неандертальцами. Известно, что примерно 30 тыс. лет назад неандертальцы фактически исчезли с лица Земли, и это произошло после очередной волны миграции *Homo sapiens* из Африки. К моменту своей «встречи» эти два вида людей могли скрещиваться и давать фертильное потомство: по данным палеогенетики, до 1–4% генома современных людей составляют гены, полученные от неандертальцев. Эти неандертальские фрагменты, попавшие в наш геном примерно 47–65 тыс. лет назад, оказались ассоциированы с рядом болезней современного человека, включая некоторые аутоиммунные заболевания, депрессию и ожирение.

В 2014 г. в журнале *Science* были опубликованы результаты геномного анализа довольно большой популяции коренных американцев, мексиканцев и латиноамериканцев Центральной Америки, значительная часть которых имела сахарный диабет (*SIGMA Type 2 Diabetes Consortium*, 2014). В ходе исследования был найден новый генетический локус, ассоциированный с диабетом, «расшифровка» которого доказала его неандертальское происхождение. Как оказалось, данный участок генома связан с содержанием в цитоплазме клеток триглицеридов, т. е., по-видимому, все с той же инсулинорезистентностью.



Конечно, это открытие не означает, что диабет «достался» нам от других видов древних людей. Мы также не можем наверняка утверждать, что идентифицированный локус был «диабетогенным» в геноме неандертальцев: его роль могла измениться впоследствии. Ясно одно: генетические особенности, предрасполагающие к развитию сахарного диабета, формировались на протяжении длительной эволюции человека.

Неолитическая революция: плюсы и минусы сельского хозяйства

Радикальные изменения в образе жизни и питании человека, которые могли стать предпосылкой эпидемии сахарного диабета, начали происходить примерно 15–10 тыс. лет назад. Этот период, известный как *неолитическая сельскохозяйственная революция*, ознаменовался переходом охотников, кочевников и собирателей к оседлой жизни. Зарождение и развитие центров земледелия в разных уголках планеты привели к изменению структуры питания, что, в свою очередь, выразилось в резком увеличении доли злаков, потреблении молока (чего не было в каменном веке) и доступности еды в целом.

Некоторые не слишком приятные последствия перехода от так называемой диеты каменного века к неолитической мы ощущаем до сих пор. Например, вскармливание грудных детей коровьим молоком стало фактором риска аутоиммунных болезней (в частности, сахарного диабета 1-го типа), а непереносимость белка *глутена* злаков – одной из наиболее частых форм пищевой аллергии у современного человека.

Самое яркое различие между диетами состояло в резком увеличении потребления углеводов, в том числе *быстрых*, и не менее резком сокращении потребления клетчатки. Впоследствии в питании все большую роль стали играть продукты, совершенно немыслимые для наших предков: рафинированные углеводы, растительные масла, переработанные злаки и молочные продукты. В наши дни доля таких продуктов в рационе доходит до 70%, и все они требуют быстрого и значительного выброса инсулина, что означает большую нагрузку на *бета*-клетки поджелудочной железы.

В каком направлении мог происходить отбор генов, связанных с диабетом, в последние несколько тысяч лет? Мог ли наш геном адаптироваться к изменению образа жизни и структуры питания? Есть мнение, что 10 тыс. лет, которые прошли после неолитической революции, – слишком малый период, чтобы в геноме произошли адаптивные изменения. Однако мы знаем примеры такой позитивной селекции – гены ферментов *лактазы*, позволяющей взрослым людям питаться



Неандерталец (*Homo neanderthalensis*) жил около 400–30 тыс. лет назад. Объем мозга 1400–1740 см³. Из-за более короткого шага тратил на передвижение на треть больше энергии, чем современный человек, преимущественно мясоед. Рейнский краеведческий музей (Германия). Фото Т. Парга. ©CC-BY-SA-4.0

коровьим молоком, и *амилазы*, отвечающей за метаболизм крахмала. В геноме неандертальцев имелась лишь одна копия гена амилазы, тогда как в геноме современных людей их множество, что важно при нашем высокоуглеводном питании.

Здесь уместно вспомнить теорию *сберегающего генотипа*, выдвинутую в 1962 г. известным американским генетиком Д. Нилом. Эта теория объясняла аккумуляцию в популяции человека «диабетических» генов и распространение ожирения тем, что наши предки не имели постоянного доступа к пище и, следовательно, отбор мог идти на фиксацию генов, позволяющих быстро накапливать запасы энергии. Другими словами, люди, которые быстро накапливали жир при избытке пищи, лучше выживали при ее нехватке.

Эта теория была популярной в течение нескольких десятилетий, однако она не может объяснить многие факты, связанные с диабетом. Во-первых, взаимосвязь между накоплением жира и инсулинорезистентностью не всегда однозначна: у ряда тучных людей нормальная чувствительность к инсулину сохраняется. Во-вторых,



В этой диораме деревни раннего неолита видны приметы неолитической хозяйственной революции, которые привели к резкому увеличению доли злаков, молочных продуктов в питании и общей доступности пищи. *Галерея науки и техники Индии (Калькутта, Индия). Фото Б. Гангули. ©CC BY 3.0*

для того чтобы успешно накапливать энергетические субстраты, нужна не устойчивость, а, напротив, высокая чувствительность к инсулину. Теория сберегающего гено типа также не объясняет, почему у коренных жителей Севера – якутов и эскимосов – сахарный диабет бывает крайне редко. Результаты исследований современных популяций с разным традиционным укладом жизни (кочевников, земледельцев) говорят о том, что в последние 10 тыс. лет отбор шел скорее на гены, «защитные» по отношению к сахарному диабету (Segurel *et al.*, 2013).

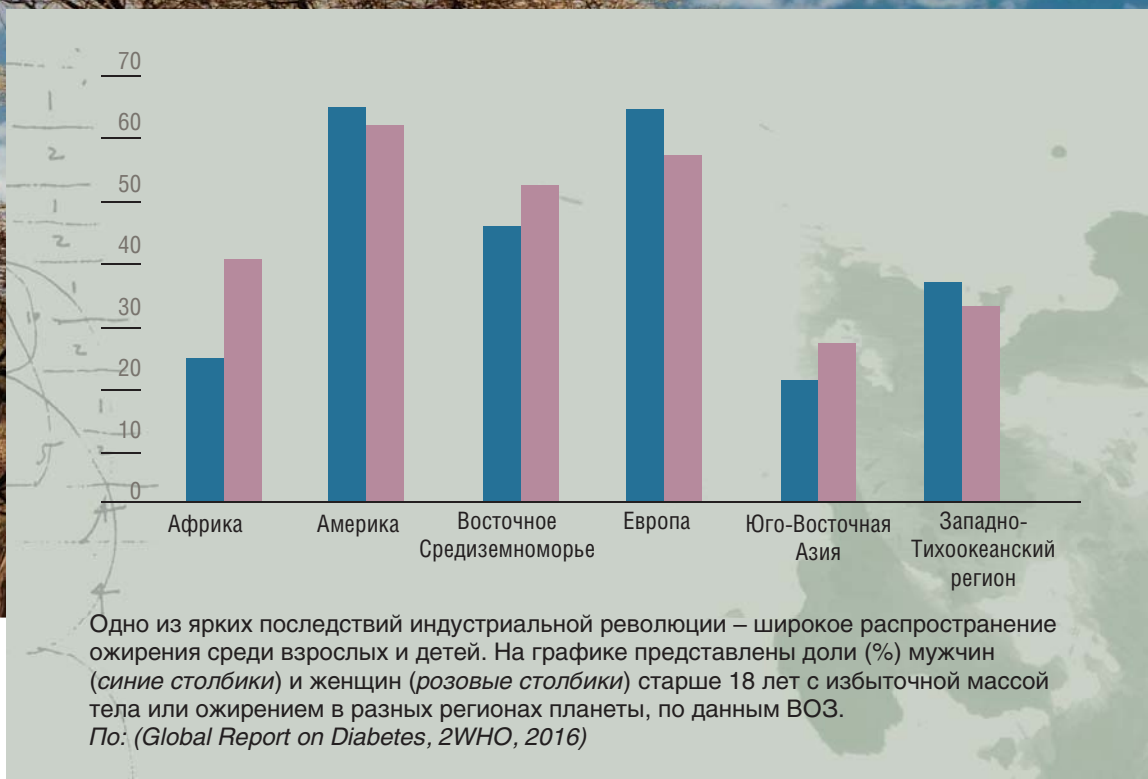
Вплоть до середины XX в. стремительного распространения сахарного диабета в человеческой популяции не наблюдалось, несмотря на изменение структуры питания. Важно заметить, что большинство людей продолжали интенсивно трудиться физически: работать в поле с рассвета до заката едва ли было легче, чем выходить на охоту. Физическая активность, как известно, сопряжена с повышением чувствительности к инсулину. К тому же для большей части населения Земли проблемой оставался скорее недостаток, а не избыток пищи. До поры

до времени это предотвращало эпидемию ожирения и сахарного диабета.

Индустриальная революция: бойтесь своих желаний

Сюжетом одной из картин нидерландского живописца Питера Брейгеля стала легенда, бытовавшая во многих средневековых европейских странах. В ней говорилось о земле, где еда будет сама запрыгивать в рот и ее не нужно добывать в поте лица. Вряд ли в то время кто-то мог представить, что эта мечта когда-нибудь станет реальностью, причем для большинства людей.

Катастрофа в массовом масштабе началась после Второй мировой войны, когда индустриальная революция привнесла новые изменения в структуру питания человека. Наконец-то еда стала доступна постоянно, а не периодически, как это бывало раньше. Широкое распространение получила реклама продуктов. Резко увеличилось потребление рафинированных углеводов, обработанных злаков, продуктов, содержащих большое количество насыщенных жиров, а употребление клетчатки, наоборот, сократилось; выросла общая калорийность еды. При этом двигательная активность стала снижаться. Все это незамедлительно отразилось на распространенности ожирения, в первую очередь



среди населения индустриально развитых стран Америки и Европы. Именно в это время и началась эпидемия сахарного диабета.

Эффект потребления рафинированных углеводов на состав тела и вероятность развития сахарного диабета наглядно демонстрируют результаты экспериментального исследования на макаках-резусах, которых в течение года кормили пищей с избыточным содержанием фруктозы. Диета привела к снижению уровня окисления жирных кислот, увеличению массы тела и жировой ткани животных. Уже через полгода уровень инсулина натощак у обезьян поднялся более чем вдвое, ухудшилась толерантность к глюкозе, а у 15% особей в течение года развился сахарный диабет (Bremer *et al.*, 2011).

Конечно, в разных странах и популяциях изменения шли с неодинаковой скоростью. Сама жизнь поставила эксперимент на коренных американцах – индейцах племени Пима из штата Аризона (США). Эта популяция до середины XIX в. жила изолировано, придерживаясь традиционного стиля питания, основу которого составляли бобы, кукуруза, кабачки и другие овощи – все, что Пима могли вырастить на своей земле. Но затем индейцев оттеснили на небольшую территорию в долине р. Хила, а позже интенсивное развитие земледелия и изменение русла реки переселенцами сделали практи-

чески невозможным для Пима ведение традиционного сельского хозяйства. У них фактически начался голод.

Спустя несколько десятилетий правительство США стало поставлять индейцам продовольственную помощь в виде муки, сахара, сала и консервированных продуктов, что в условиях низкой физической активности привело к стремительному распространению ожирения и сахарного диабета. Если в начале XX в. среди Пима был зафиксирован лишь один случай сахарного диабета, то к концу столетия болел уже каждый второй взрослый индеец. Аризонские Пима превратились в популяцию с самой высокой распространенностью сахарного диабета 2-го типа в мире.

Можно задаться вопросом: возможно, столь быструю эпидемию болезни определили какие-то генетические особенности индейцев? Однако есть еще одна популяция Пима, проживающая в изолированном и труднодоступном районе Мексики и до 1991 г. почти не имеющая контактов с внешним миром. Пища этих индейцев остается традиционной, с относительно низким содержанием жира и высоким – клетчатки, на фоне достаточно высокой двигательной активности. Как показали исследования, представители мексиканской популяции, в сравнении с аризонскими Пима, более чувствительны к инсулину и намного реже болеют сахарным диабетом (Schulz *et al.*, 2015).

При сравнении палеолитической и современной диет видно, что диета каменного века содержит меньше жира, но имеет лучший липидный «профиль». Она ассоциирована с меньшей потребностью в инсулине и более высокой чувствительностью к нему, а также с меньшей вероятностью возникновения окислительного стресса и воспаления. Когда женщины придерживались такой диеты во время беременности, у них отмечались меньшая прибавка в весе тела и меньший вес ребенка при рождении. А так как беременность – это состояние, характеризующееся инсулинорезистентностью, то у этих женщин имелись все признаки более высокой чувствительности к инсулину

Постиндустриальное время принесло человечеству не только высококалорийное питание, но и драматическое уменьшение физической активности в результате развития транспорта, появления компьютера и Интернета. Таким образом, были созданы идеальные условия для продолжения эпидемии сахарного диабета. Предполагается, что в ближайшие десятилетия наибольший рост распространения ожирения и сахарного диабета будет происходить в странах Африки и Юго-Восточной Азии.

Как предотвратить негативный сценарий? Во-первых, путем здорового питания. Есть мнение, что нам надо оглянуться назад, «вернуться к истокам». В последнее время увеличивается число сторонников так называемой палеолитической диеты. Ее особенность – относительно небольшая доля углеводов, более высокая доля белка и отсутствие молочных продуктов. Показано, что у сторонников такой «диеты охотников и собирателей» процент жира в организме меньше, а чувствительность к инсулину выше по сравнению с теми, кто придерживается «западного» стиля питания. Однако не было выявлено никакого достоверного влияния палеолитической диеты на метаболические параметры пациентов с нарушениями углеводного обмена по сравнению с современными физиологическими вариантами рациона (например, средиземноморской диетой или диетой, рекомендованной при сахарном диабете) (Jamka et al., 2020). Так что возврат в каменный век, по-видимому, не оправдан.

Второй важнейший подход – повышение физической активности. Об этом говорят результаты исследования DPP (*Diabetes Prevention Program*), проведенного на людях с высоким риском развития сахарного диабета 2-го типа (Florez et al., 2017). Часть испытуемых почти 3 года участвовала в программе модификации образа жизни, интенсивно занимаясь фитнесом с помощью

индивидуального инструктора и диетолога. Риск развития диабета у этих людей снизился почти на 60% в сравнении с теми, кто принимал фармакологическое плацебо. Вот так модификация образа жизни позволила «преодолеть» неблагоприятный эффект генетической предрасположенности.

Нам нужно помнить, что человеческий геном сформировался в условиях, значительно отличающихся от современных. В последнее время наша генетическая программа вступила в противоречие с изменившимся образом жизни человека – она просто не выдерживает натиска цивилизации. Такое несоответствие способствует развитию дегенеративных заболеваний, включая сахарный диабет 2-го типа. Но несмотря на то что биология человека рассчитана на совсем другой образ жизни, только от нас зависит, попадем ли мы в эту «эволюционную ловушку».

Литература

Климонтов В. В., Солдатова Г. С. Профилактика сахарного диабета. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2014. 47 с.

Уэйд Н. На заре человечества: неизвестная история наших предков / пер. с англ. М.: Альпина нон-фикшн, 2017. 408 с.

Chan C. J., Steiner D. F. Insulin Through the Ages: Phylogeny of a Growth Promoting and Metabolic Regulatory Hormone // *Amer Zool.* 2000. V. 40. P. 213–222.

International Diabetes Federation. IDF Diabetes Atlas. 9th ed. 2019. Docmyn: <https://www.diabetesatlas.org/en/>

Francis-Emmanuel P. M. et al. Glucose Metabolism in Adult Survivors of Severe Acute Malnutrition // *J. Clin Endocrinol Metab.* 2014. V. 99(6). P. 2233–2240.

Jamka M. et al. The Effect of the Paleolithic Diet vs. Healthy Diets on Glucose and Insulin Homeostasis: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials // *J. Clin Med.* 2020. V. 9(2). Pii: E296.

Lashin S. A. et al. Evolutionary Analysis and Mathematical Modeling of Gene Networks of Energy Metabolism Disorders // *Systems Biology and Biomedicine (SBioMed-2018): Symposium (21–22 Aug. 2018, Novosibirsk, Russia)*. Novosibirsk: ICG SB RAS, 2018. P. 78.

Savona-Ventura C., Mogensen C. E. *The History of Diabetes Mellitus*. ELSEVIER MASSON SAS, France, 2009.

Schulz L. O., Chaudhari L. S. High-Risk Populations: The Pimas of Arizona and Mexico // *Curr Obes Rep.* 2015. V. 4(1): P. 92–98.

Ségurel L., et al. Positive Selection of Protective Variants for Type 2 Diabetes from the Neolithic Onward: a Case Study in Central Asia // *Eur J. Hum Genet.* 2013. V. 21(10): 1146–51.

SIGMA Type 2 Diabetes Consortium. Sequence Variants in SLC16A11 are a Common Risk Factor for Type 2 Diabetes in Mexico // *Nature.* 2014. V. 506(7486). P. 97–101.

Watve M. G., Yajnik C. S. Evolutionary Origins of Insulin Resistance: a Behavioral Switch Hypothesis // *BMC Evol Biol.* 2007. V. 7. P. 61.

МЕЛАТОНИН —

при диабете и ожирении



ПОКАЗАН

Верно говорят: мал золотник, да дорог. Гормон мелатонин представляет собой очень маленькую молекулу и синтезируется в организме из аминокислоты триптофана в очень малом количестве. Однако эта древнейшая сигнальная молекула принимает участие в регуляции множества сторон жизнедеятельности нашего организма, включая сон, кровообращение, иммунитет, работу эндокринной и лимфатической систем. Последние исследования говорят о том, что мелатонин можно успешно использовать не только в качестве снотворного средства при нарушениях суточного ритма, но и для лечения ожирения и сахарного диабета 2-го типа. И одним из самых перспективных препаратов для этой цели может стать инновационная разработка новосибирского НИИ клинической и экспериментальной лимфологии

Ключевые слова: мелатонин, суточные ритмы, ожирение, диабет 2-го типа, иммунная система, лимфатическая система, печень, апоптоз, «Комплекс М».

Key words: melatonin, circadian rhythms, obesity, type 2 diabetes, the immune system, lymphatic system, liver, apoptosis, "Complex M"



Сотрудники отдела экспериментальной фармакологии НИИ клинической и экспериментальной лимфологии – филиала ФИЦ ИЦиГ СО РАН (Новосибирск):

Анна Вениаминовна ШУРЛЫГИНА – доктор медицинских наук, профессор, старший научный сотрудник лаборатории фармацевтических технологий;

Светлана Викторовна МИЧУРИНА – доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующая группой экспериментальной фармакологии;

Любовь Никифоровна РАЧКОВСКАЯ – кандидат химических наук, заведующая лабораторией фармацевтических технологий;

Андрей Юрьевич ЛЕТЯГИН – доктор медицинских наук, профессор, руководитель НИИКЭЛ;

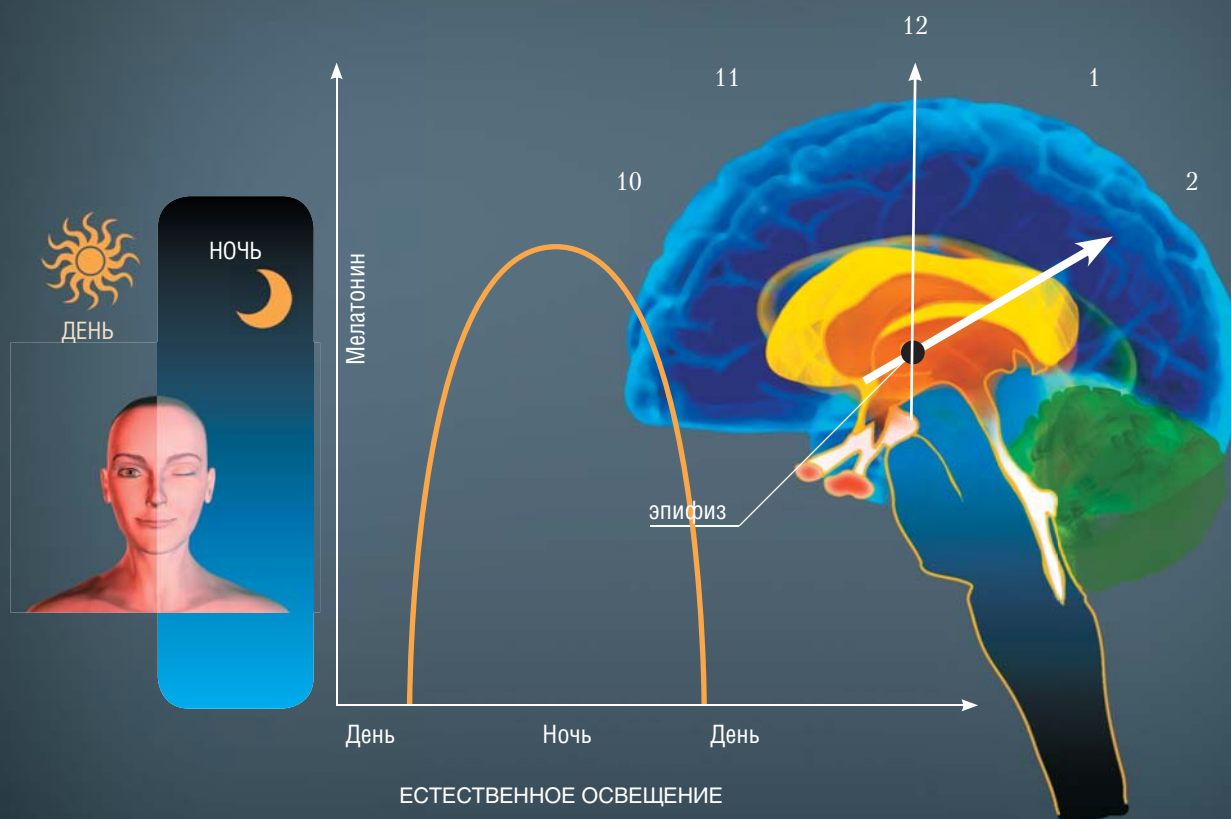
Ирина Юрьевна ИЩЕНКО – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник группы экспериментальной фармакологии;

Французский философ и ученый Рене Декарт недаром называл этот маленький, размером с горошину орган головного мозга «седалищем души». Функции *эпифиза* еще во многом остаются загадкой, хотя мы знаем, что эта эндокринная железа действительно влияет на эмоциональное, психическое состояние человека и животного.

Функциональная роль эпифиза связана с его основным гормоном – *мелатонином*. Эпифизарный мелатонин поступает в кровь и разносится по всему организму, где участвует в регуляции самых разных биологических процессов. К примеру, он индуцирует процессы торможения в центральной нервной системе и способствует наступлению сна, регулирует суточный ритм температуры тела, активизирует иммунную систему, повышает функцию антиоксидантной системы организма и т. д. Снижение продукции мелатонина с возрастом может быть фактором повышенного окислительного повреждения клеток у пожилых людей, что способствует развитию таких «возрастных» заболеваний, как болезни Альцгеймера и Паркинсона (Peschke, 2008).

До 80% мелатонина в сыворотке крови имеет эпифизарное происхождение. Но мелатонин вырабатывается не только в эпифизе, но и в периферических тканях, в первую очередь в желудочно-кишечном тракте, включая кишечник, поджелудочную железу и печень. Так, в слизистой оболочке толстой кишки синтезируется в 400 раз больше мелатонина, чем в эпифизе, при этом его содержание регулируется в основном приемом и характером пищи, а не чередованием света и темноты (Мелатонин: перспективы применения в клинике, 2012). Биологическое действие внеэпифизарного мелатонина реализуется, по-видимому, непосредственно там, где он синтезируется. Учитывая необыкновенную распространенность гормона в организме, можно предполагать, что он играет ключевую роль в местной координации клеточных функций. Такое широкое распространение мелатонина отражает его важную роль как межклеточного нейроэндокринного регулятора и координатора многих сложных и взаимосвязанных биологических процессов

© А. В. Шурлыгина, С. В. Мичурина, Л. Н. Рачковская, А. Ю. Летягин, И. Ю. Ищенко, 2020



Биологическими часами организма служит эпифиз (шишковидная железа), а его гормон мелатонин можно уподобить маятнику, который обеспечивает ход этих часов, регулируя физиологические ритмы организма и их подстройку к условиям внешней среды. Концентрация мелатонина в сыворотке крови ночью в 30 раз больше, чем днем, достигая пика в 2 ч по местному времени

Важная особенность эпифизарного мелатонина заключается в том, что его продукция имеет суточный ритм, достигая пика в темное время суток, а в светлое синтез мелатонина блокируется.

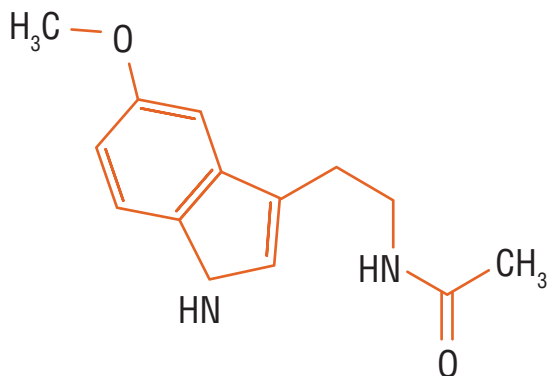
Так как самым очевидным эффектом этого «ночного» гормона является его снотворное действие, препараты мелатонина часто назначают при различных нарушениях сна из-за рассогласования биологических ритмов. Последнее случается в самых разных жизненных ситуациях: при сменной и ночной работе, дальних перелетах, работе в Арктике и Антарктике, неправильном режиме

дня, а также сне при включенном свете. Кроме того, так как мелатонин обладает свойствами антидепрессанта, его назначают для улучшения настроения.

Но в этой статье мы остановимся на гораздо менее известных эффектах мелатонина, связанных с его влиянием на углеводный и жировой обмен, лимфатическую и иммунную системы, процессы жизнедеятельности и смерти клеток.

Регулятор обмена веществ

В инструкциях по применению мелатонина среди противопоказаний указано такое заболевание, как сахарный диабет. Но это верно лишь для *диабета 1-го типа*, аутоиммунного заболевания, при котором дефицит гормона инсулина возникает на фоне повышенного синтеза мелатонина в эпифизе (Коненков и др., 2013). Однако далеко не все знают, что применение мелатонина показано в случае широко распространенного



Мелатонин

сахарного диабета 2-го типа, связанного с нарушением чувствительности клеток к инсулину и дисфункцией бета-клеток поджелудочной железы, вырабатывающих этот гормон.

Мелатонин воздействует на функцию этих клеток через мембранные рецепторы (MT1 и MT2), которые также имеются у клеток в некоторых структурах мозга и во многих периферических органах. Таким образом происходит синхронизация производства инсулина и чередования светлого и темного времени суток. Кроме того, установлено, что мелатонин способствует воспроизводству бета-клеток в поджелудочной железе, улучшает чувствительность тканей к инсулину и уменьшает окислительный стресс в экспериментальных моделях сахарного диабета 2-го типа (Peschke *et al.*, 2006; Peschke, 2008).

Таким образом, этот гормон играет важную роль в регуляции уровня глюкозы в крови и секреции инсулина, поэтому неудивительно, что и сахарный диабет 2-го типа, и сопутствующие ему патологии – алиментарное (первичное) ожирение и метаболический синдром – развиваются на фоне нарушения/снижения продукции мелатонина (Bährl *et al.*, 2012; Hardeland, 2012). У больных сахарным диабетом 2-го типа нормальный циркадный ритм мелатонина, как правило, отсутствует, а его уровень в целом понижен.

Причина подобных нарушений может быть различной. С одной стороны, возникновение такой патологии может быть связано с определенными вариантами генов, кодирующими рецепторы мелатонина, из-за чего чувствительность к этому гормону падает (Tosini *et al.*, 2014). С другой стороны, сахарный диабет 2-го типа часто начинается на фоне рассогласования суточных ритмов из-за ночного освещения, что приводит к частичной или полной блокаде синтеза мелатонина в эпифизе.

Сейчас во всем мире, особенно в развитых странах, наблюдается буквально эпидемия сахарного диабета 2-го типа и связанных с ним сердечно-сосудистых

Мелатонин воздействует на клетки через мембранные рецепторы MT1 и MT2, активность которых снижается при ночном освещении, а также через рецепторы в ядре клеток, влияя таким образом на уровень активации ряда генов, в том числе в органах, определяющих суточные ритмы организма (эпифизе, сетчатке глаза, гипоталамусе и др.). И сам гормон, и его метаболиты (6-гидроксимелатонин) могут также беспрепятственно проникать в цитоплазму клетки через клеточную мембрану, где связывают свободные радикалы кислорода, защищая от оксидативного повреждения макромолекулы (белки, жиры, ядерную и митохондриальную ДНК) во всех субклеточных структурах (Carpentieri *et al.* 2012; Bouroutzika *et al.* 2020)

осложнений, смертность от которых выше, чем от онкологических болезней. Согласно данным Минздрава РФ, риск развития диабета сегодня угрожает каждому десятому россиянину. И мелатонин может занять свое место в ряду эффективных фармакологических средств для борьбы с подобными нарушениями.

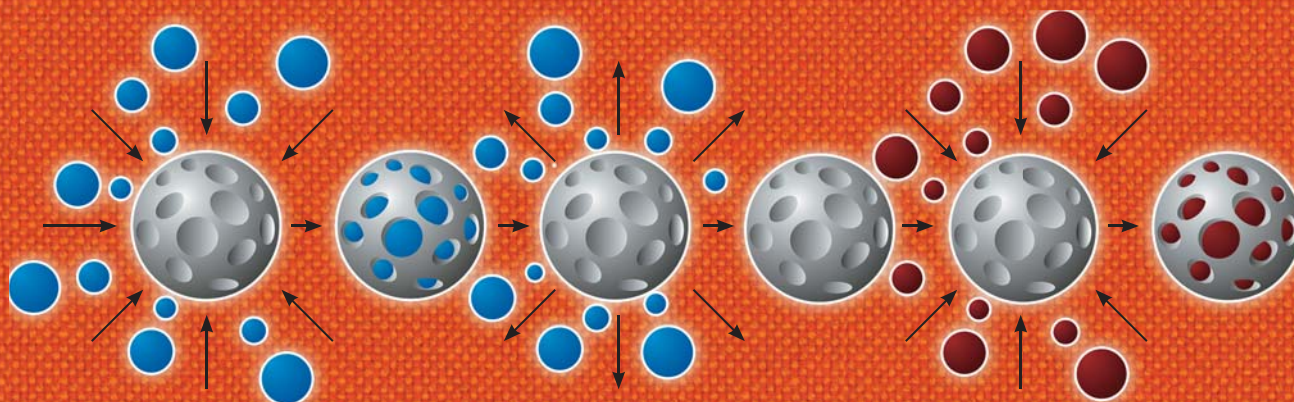
Печень Прометея

Нашим первым шагом по выяснению механизмов действия мелатонина при сахарном диабете 2-го типа стало изучение его влияния на печень, которая играет основную роль в поддержании постоянства внутренней среды организма. Именно печень выполняет функции «метаболического мозга», координируя потоки разнообразных соединений и адаптируя метаболизм к текущим потребностям нашего организма, и она же является одним из главных органов-мишеней для любых метаболических нарушений.

Развитие метаболического синдрома и сахарного диабета 2-го типа также сопровождается нарушениями функций печени. Мы изучили эти изменения на модельном объекте – лабораторных мышках линии BKS.Cg-Dock7^m+/⁺Lepr^{db}/J, генетически предрасположенных к развитию ожирения и диабета, для которых характерен пониженный уровень секреции эпифизарного мелатонина.

У взрослых животных этой линии были обнаружены отчетливые структурные перестройки, свидетельствующие о развитии у них неалкогольной жировой болезни печени. Микроскопические исследования выявили накопление в клетках печени жира и гликогена («животного крахмала»), нарушение клеточных структур, ответственных за синтез белка, и митохондрий – «клеточных электростанций», а также застой лимфы, особенно у самцов (Michurina *et al.*, 2016).

На последнее стоит обратить особое внимание, так как лимфатическая система, сосуды которой



- мелатонин
- токсические вещества

В препарате «Комплекс М» мелатонин содержится в пористом носителе и постепенно высвобождается после приема. Сам препарат представляет собой порошок белого цвета, который надо принимать вместе с водой. Носитель является сорбентом, способным удерживать и выводить токсины и лишнюю жидкость, поэтому «Комплекс М» также имеет детоксицирующий и противоотечный эффекты

пронизывают все органы и ткани, – это тот дренаж, по которому идет отток жидкости из межклеточного пространства. С этой жидкостью из ткани выводятся продукты обмена веществ, в том числе токсические. Застой лимфы свидетельствует о значительной нагрузке на эту систему и способствует развитию кислородного голодания тканей печени, что наряду с повреждением митохондрий приводит к усилению программируемой гибели (*апоптозу*) клеток.

Может ли дополнительный прием мелатонина повлиять на все эти структурные изменения? Известно, что мелатонин улучшает состояние митохондрий (Srinivasan *et al.*, 2011); под регулирующим влиянием этого гормона находятся и транспортные пути для лимфы и лимфоидных клеток. Таким образом, можно обоснованно предположить, что при ожирении и сахарном диабете препараты мелатонина позволяют добиться коррекции печеночной патологии.

Мелатонин и иммунная система

Еще одна важнейшая система организма, которая страдает при сахарном диабете 2-го типа, – иммунная. Основными рабочими элементами этой системы являются иммунные клетки (макрофаги, дендритные клетки, различные типы лимфоцитов, включая Т-киллеры), которые образуются и созревают в красном костном мозге и тимусе. Попадая в кровь, такие клетки разносятся по всем органам и тканям, где осуществляют надзор за состоянием внутренней среды организма, уничтожая

чужеродные молекулы, патогенные вирусы и бактерии, а также злокачественные клетки.

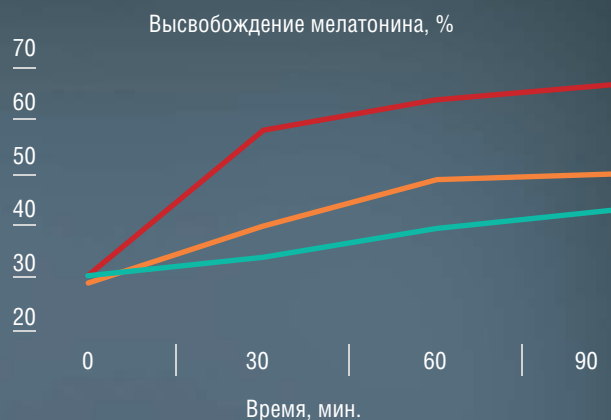
В качестве модельного объекта для оценки влияния мелатонина на состояние иммунной системы мы использовали лабораторных крыс с ожирением, которое служит важным фактором риска развития сахарного диабета 2-го типа. Ранее уже было показано, что этот гормон улучшает иммунный статус таких животных, стимулируя дифференцировку лимфоцитов, участвующих в формировании иммунного ответа организма (Arushanian *et al.*, 2006).

В нашем эксперименте крыс содержали на диете, в которую входили продукты с высоким содержанием жира, что привело к увеличению у них массы тела, повышению содержания триглицеридов и общего холестерина в сыворотке крови, а также жира в печени.

Заметно пострадала и иммунная система упитанных животных. В их селезенке изменилась численность иммунных клеток, в том числе понизилось содержание антигенпрезентирующих клеток и активированных лимфоцитов, обеспечивающих быстрый иммунный ответ на конкретные патогены. Количество активированных лимфоцитов упало и в лимфоузлах печени, а в крови увеличилось число лейкоцитов. В лимфоцитах крови изменился баланс активности окислительно-восстановительных ферментов, что говорит о нарушении энергетического обмена и снижении функциональной активности этих клеток.

Инъекции мелатонина животным в течение двух недель привели к нормализации практически всех этих показателей, включая вес тела.

Применение пористых сорбентов-носителей для доставки мелатонина в организм позволяет смоделировать эффект эпифиза, дозированно выделяющего гормон. На графике представлены кривые зависимости постепенного высвобождения гормона мелатонина из пористых алюмокремниевых сорбентов с разной структурой и химической природой поверхности. Более медленное выделение гормона при их контакте с жидкой средой происходит при использовании сорбента с наименьшим размером частиц (нижняя кривая)



Комплекс М – «продвинутый» мелатонин

Таким образом, все имеющиеся на сегодня данные говорят о том, что, хотя в лечении сахарного диабета 2-го типа и ожирения мелатонин пока не используется, это новое терапевтическое направление имеет полное право на существование. При этом результаты экспериментальных работ в этой области, когда мелатонин применялся в «чистом виде», до сих пор неоднозначны и противоречивы, несмотря на их многочисленность. Может быть, это связано с тем, что мелатонин, введенный путем инъекции или с пищей, быстро выводится из организма, тогда как эпифиз выделяет гормон постепенно, в течение темного времени суток.

В новосибирском НИИ клинической и экспериментальной лимфологии – филиале ФИЦ ИЦиГ СО РАН разработан и синтезирован новый препарат мелатонина – «Комплекс М». Он представляет собой оригинальную композицию из носителя – пористого оксида алюминия с преимущественным размером пор 10–100 нм, кремнийсодержащего полимера полиметилсилоксана, относящегося к силиконовым соединениям, и гормона мелатонина, содержание которого в препарате составляет 0,15% (Патент № 2015100920/05(001238) от 11.01.2016).

Поверхность пор носителя характеризуется набором как гидрофильных участков за счет матрицы из оксида алюминия, так и гидрофобных за счет полиметилсилоксана. Это создает условия, способствующие многоточечному связыванию на их поверхности различных средне- и высокомолекулярных соединений. Благодаря таким физико-химическим особенностям препарата мелатонин высвобождается из него постепенно, что позволяет добиться эффекта «протезирования» мелатонин-продуцирующей функции эпифиза.

С другой стороны, на пористом носителе могут адсорбироваться различные токсические соединения.

В НИИКЭЛ – филиале ФИЦ ИЦиГ СО РАН в течение ряда лет разрабатываются оригинальные лекарственные препараты на основе пористых носителей (модифицированных сорбентов), поры которых служат «микроракетами» для активных фармацевтических субстанций. Как известно, сорбенты могут фиксировать на своей поверхности различные молекулы, поэтому сорбционная терапия традиционно применяется для выведения токсических продуктов из организма. Однако ее можно использовать и для целевой доставки лекарственных средств. Сорбент не разрушается при прохождении по желудочно-кишечному тракту, поэтому удерживаемый на поверхности носителя фармацевтический агент выходит из него постепенно, в течение длительного времени (Бородин и др., 2014). Это позволяет избежать передозировки, а также снижает риск побочных эффектов и интоксикаций.

Новые препараты, разрабатываемые в институте, ориентированы преимущественно на применение сырья отечественного производства. Для их получения используются экономичные и экологически чистые технологии, исключающие применение высоких температур и органических растворителей

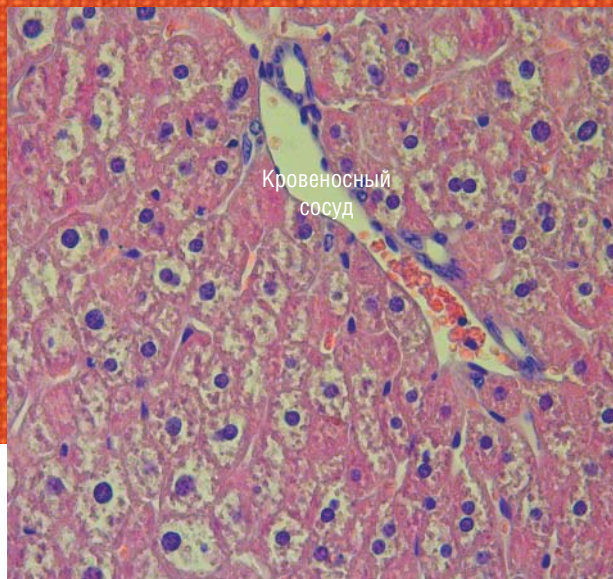
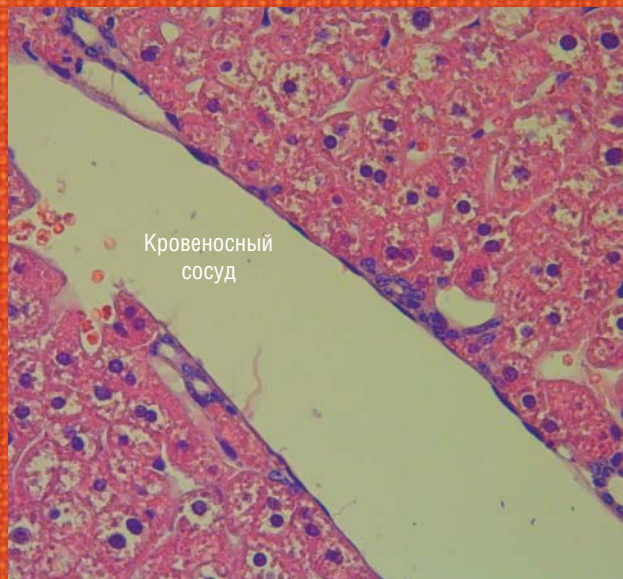
Благодаря достаточно высокой сорбционной емкости препарат проявляет детоксицирующий эффект, а также противоотечный за счет регуляции баланса тканевой жидкости.

Во время доклинических испытаний при содержании мышей *C57Bl/6J* при круглосуточном освещении, которое подавляет синтез мелатонина в эпифизе, были получены обнадеживающие результаты. В этом случае введение «Комплекса М» можно рассматривать как своего рода заместительную терапию.

Так, ежедневное введение водной суспензии «Комплекса М» самцам мышей этой линии уже через неделю привело к значительному увеличению мышечной

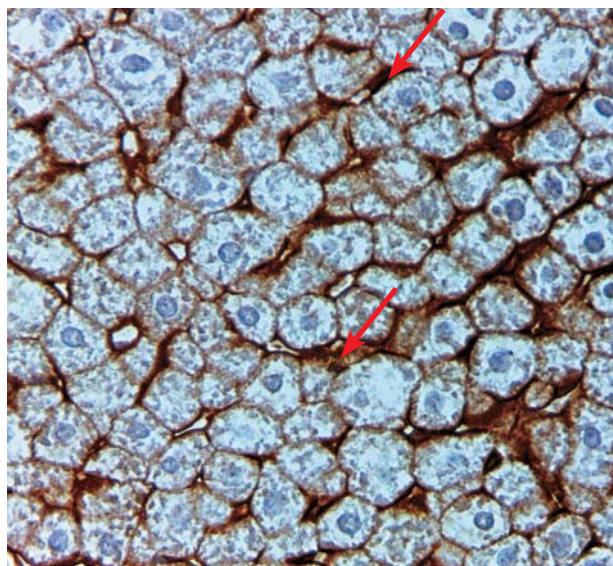
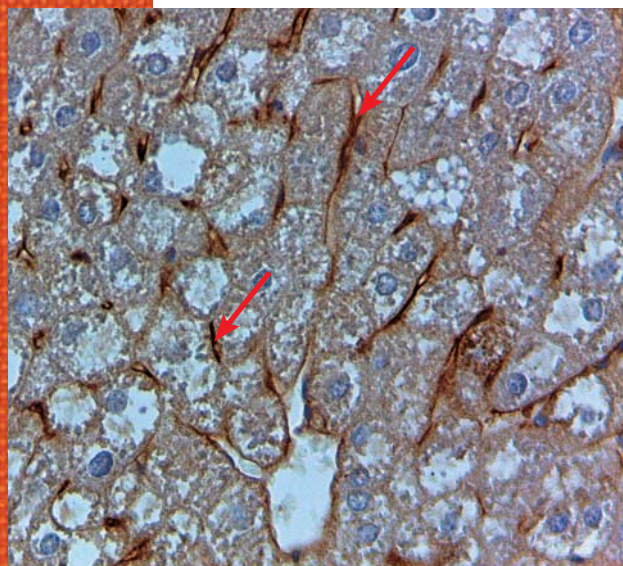
БЕЗ ЛЕЧЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ «КОМПЛЕКСА М»



Внутрижелудочное введение в течение 8 недель «Комплекса М» линейным мышам с генетически детерминированным развитием ожирения и сахарного диабета 2-го типа значительно улучшило структурно-функциональные показатели циркуляции крови и лимфотока в печени (*вверху*). Микроскопическое исследование показало наличие расширенных кровеносных сосудов и застой жидкости в печени животных, которые принимали плацебо (*слева*). У животных, принимавших препарат, эти параметры нормализовались (*справа*).

Кроме того, иммуногистохимический анализ показал, что в результате приема «Комплекса М» на поверхности клеток эндотелия (внутренней выстилки) лимфатических сосудов и синусоидов печени увеличилась площадь, занятая рецепторами LYVE-1 (*внизу*). Этот рецептор играет важную роль в транспорте и обороте гиалуроновой кислоты – одного из основных компонентов внеклеточного матрикса, которая содержится во многих биологических жидкостях и отличается способностью удерживать воду. Возрастание площади экспрессии LYVE-1 в эндотелиальных клетках внутридольковых синусоидных капилляров приводит к активации лимфатического транспорта гиалуроновой кислоты в пространствах Диссе – узких просветах между стенками этих капилляров и гепатоцитами, где происходит обмен веществ между плазмой крови и клетками, и это улучшает дренаж жидкости в органе



силы и выносливости животных. В то же время прием обычного мелатонина в аналогичной дозе не оказал такого эффекта. Эти результаты говорят о перспективности применения «Комплекса М» у людей, чья деятельность связана с тяжелыми физическими нагрузками: спортсменов, военнослужащих, вахтовиков и др.

Также выяснилось, что препарат благоприятно влияет на состояние селезенки – многофункционального органа, выполняющего кроветворные, иммунные и обменные функции, а также депонирующего кровь. Усиление кровотока в венозных сосудах и ряд структурных изменений этого органа в ответ на прием «Комплекса М» свидетельствуют об активации его иммунных функций. Кроме того, введение этого препарата повышало корково-мозговой индекс тимуса (вилочковой железы), что может указывать на стимуляцию дифференцировки Т-клеток иммунной системы.

Успешным оказалось и лечение мышей с генетически детерминированным развитием ожирения и сахарного диабета, о которых говорилось выше. Внутрижелудочное введение «Комплекса М» взрослым особям привело к нормализации у них структурно-функциональных показателей циркуляции крови и лимфы, а также к улучшению состояния клеток печени и усилению регенеративного потенциала этого органа.

Наглядной иллюстрацией положительного действия «Комплекса М» на таких животных могут служить молекулярные особенности запрограммированной гибели клеток печени. Как уже говорилось выше, плохое снабжение клеток кислородом у мышей этой линии негативно сказывается на структуре и функциях митохондрий – основных внутриклеточных участников апоптоза. Изучение ультраструктурного состояния этих внутриклеточных органелл и динамики продукции двух белков, регулирующих клеточное «самоубийство», –

антиапоптотического Bcl-2 и проапоптотического Bad – показало, что у взрослых самцов активируется так называемая митохондриальная «ветвь» апоптоза. Введение «Комплекса М» привело к преобладанию «защитника» Bcl-2 над «клеточным убийцей» Bad, что говорит о восстановлении клеточной защиты в печени (Мичурина 2019; Michurina *et al.*, 2016).

Таким образом, можно утверждать, что как сам мелатонин, так и новый препарат мелатонина «Комплекс М» обладают мощными антиоксидантными, иммуномодулирующими, лимфотропными, гепатопротекторными и гиполипидемическими свойствами. И в этом смысле они являются перспективными средствами для коррекции нарушений липидного обмена и иммунного статуса при ожирении и нарушении светового режима, а также в комплексном лечении сахарного диабета 2-го типа.

При этом «Комплекс М» обладает более выраженным терапевтическим действием по сравнению с обычными препаратами мелатонина. Он не только безопасен, но и проявляет детоксикационные свойства за счет пористой структуры носителя.

Препарат, разработанный новосибирскими специалистами, успешно прошел лабораторно-экспериментальные испытания. Однако трудно сказать, когда он появится на прилавках аптек. Официальные доклинические и клинические испытания нового лекарственного средства – процедура всегда дорогостоящая, а в мире к тому же идет пандемия нового вирусного заболевания. И это, кстати, лишний повод напомнить о роли мелатонина в поддержании здоровья больных сахарным диабетом 2-го типа, так как такие пациенты входят в группу риска.

Литература

Арушанян Э.Б., Наумов С.С. Противовоспалительные возможности мелатонина // *Клиническая медицина*. 2013. Т. 91, № 7. С. 18–22.

Арушанян Э.Б., Щетинин Е.В. Мелатонин как универсальный модулятор любых патологических процессов // *Патологическая физиология и экспериментальная терапия*. 2016. Т. 60, № 1. С. 79–88.

Бородин Ю.И., Труфакин В.А., Мичурина С.В., Шурлыгина А.В. Структурно-временная организация печени, лимфатической, иммунной, эндокринной систем при нарушении светового режима и введении мелатонина. Новосибирск: Изд. дом «Манускрипт», 2012. 208 с.

Коненков В.И., Климонтов В.В., Мичурина С.В. и др. Мелатонин при сахарном диабете: от патофизиологии к перспективам лечения // *Сахарный диабет*. 2013. № 2. С. 11–16.

Мичурина С.В., Васендин С.В., Иценко Ю.И. Физиологические и биологические эффекты мелатонина: некоторые итоги и перспективы изучения // *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2018. Т. 104, № 3. С. 257–271.

Мичурина С.В., Летягин А.Ю., Шурлыгина А.В. и др. Гепато-иммуно-эпифизарная ось межсистемных взаимодействий. Мелатонин и структурно-функциональные изменения печени и иммунной системы при ожирении и сахарном диабете 2 типа. Новосибирск: Изд. дом «Манускрипт», 2019. 304 с.



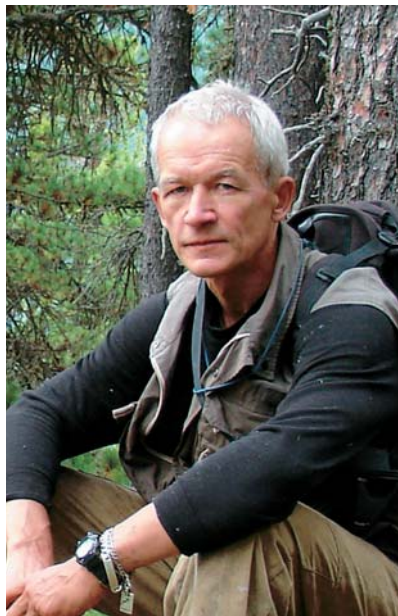
Пожары и гари сибирской тайги

«Черное небо», дымный «туман» с отчетливым запахом гари – таким осталось в памяти населения Сибири лето 2019 г. В тот год площадь охваченной огнем тайги уже к середине августа превышала 5 млн га – дым от этих лесных пожаров дошел до Урала и Казахстана. Леса, пройденные огнем, восстанавливаются далеко не всегда. При этом ученые относят лиственницу и сосну – доминантов северной тайги – к деревьям «огнелюбам». Так возникает парадокс: если эти леса не будут гореть, они не будут расти

Ключевые слова: лесные пожары, охрана лесов, изменение климата, горимость лесов, борьба с лесными пожарами, хвойные породы, лиственница, сосна.

Key words: forest wildfires, forest protection, climate change, fire danger, wildfire damping, coniferous trees, larch, pine

Горят лиственничники Эвенкии. Июль 2019 г. Снимок Terra/MODIS



ХАРУК Вячеслав Иванович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией мониторинга леса Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (Красноярск), профессор Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета (Красноярск). Автор и соавтор более 150 научных работ



ПОНОМАРЕВ Евгений Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга леса Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (Красноярск), доцент Сибирского федерального университета (Красноярск). Автор и соавтор более 130 научных работ, в том числе 8 монографий

Леса в Сибири горели всегда, но в XXI в. частота и площади лесных пожаров возросли: в отдельные годы пройденные огнем территории достигали 10–12 млн га. Такие катастрофические пожары случались и раньше (например, в 1915 г. сибирская тайга горела на площади 12 млн га), но значительно реже.

Уже при беглом взгляде на карту территорий, пройденных огнем, может показаться, что только за последнее десятилетие северная тайга выгорела наполовину, и в ближайшее время мы рискуем остаться без сибирских лесов. Но следует различать «пройденные огнем площади» и погибшие древостои, поскольку последствия зависят как от вида и интенсивности пожара, так и от типа растительного покрова.

При *верховом пожаре*, когда огонь скачет по кронам, гибель деревьев неизбежна. Однако при малоинтенсивных *низовых пожарах*, особенно в сосняках и лиственничниках, значительной гибели древостоя обычно не происходит. В реальности до половины всех лесов, испытавших на себе воздействие огня, не погибает (Барталев и др., 2015).

© В. И. Харук, Е. И. Пономарев, 2020



КАК ГОРИТ В «БОРЕАЛЬНОМ ЗАРУБЕЖЬЕ»

Ситуация в лесах Канады и Сибири не слишком отличается: в Стране кленового листа ежегодная площадь пожаров с 1970-х гг. удвоилась и составляет более 2,5 млн га, достигая 7 млн га в неблагоприятные годы. Возрастает и число крупных лесных пожаров. На северных территориях Канады, как и в Сибири, пожары тушат только вблизи поселений и объектов промышленной инфраструктуры. В США ежегодная площадь пожаров за последние 50 лет возросла вчетверо. Регулярно горят леса Аляски: в 2019 г. горели леса на площади более 1 млн га, а столица штата Анкоридж весь июль была накрыта плотным облаком смога. Но горят, разумеется, не только северные леса. В теплой Калифорнии в 2018 г. сгорело 800 тыс. га лесов – и это при высокой численности и технической оснащённости «огнеборцев».

В 2019 г. экстремальная горимость наблюдалась не только в Сибири, но и в тропической Амазонии. В том же году катастрофические пожары погубили 12 млн га «бушлендов» (кустарниковых полей) Австралии. Потепление привнесло пожары даже в гренландскую тундру

Лиственница способна залечивать раны: со временем подсушины – следы бывших пожаров – могут полностью зарастать (слева). Их следы на спилах деревьев позволяют датировать бывшие пожары



С продвижением в высокие широты число пожаров в ареале лиственницы снижается, однако площадь территорий, пройденных огнем, возрастает вплоть до широт полярного круга

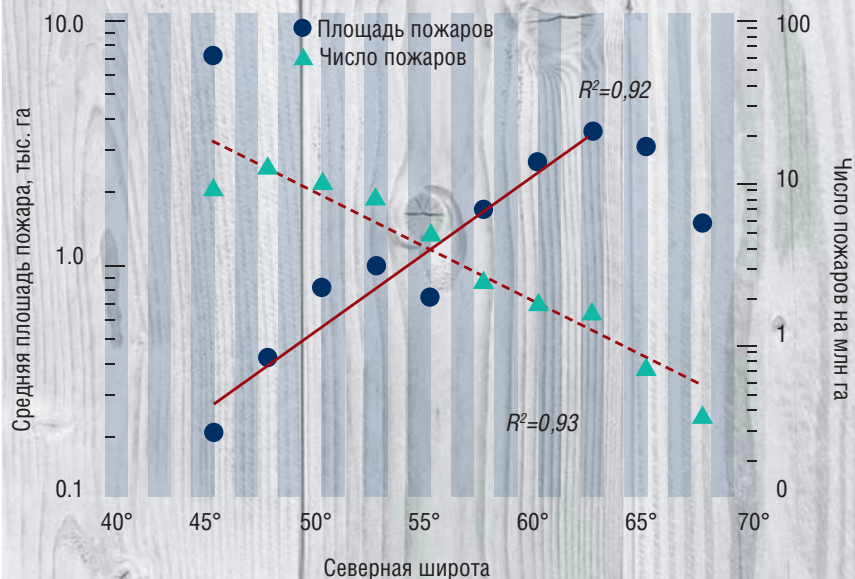
С чего начинаются пожары?

Согласно парадигме специалистов-пирологов, существует «триада загорания леса», в которую входят: наличие лесных горючих материалов, их «зрелость» (готовность к возгоранию, зависящая от погоды) и источник огня. При отсутствии любой составляющей пожар невозможен.

Горючих материалов в тайге всегда хватает. На их готовность к воспламенению, скорость распространения и вид пожара влияют осадки, температура и влажность воздуха, ветер, тип растительного покрова, рельеф местности.

В лесах средних широт, где проживает большая часть населения, причиной более 80% возгораний является «человеческий фактор». Но чем дальше на север и меньше плотность населения (в Эвенкии, например, она составляет 0,03 чел./км²), тем ниже вероятность пожаров из-за неосторожности с огнем. Немаловажно, что сами северяне издавна бережно относятся к лесам, знают и чтут таежные законы.

В высоких широтах основной источник возгораний (до 90% случаев) – это разряды молний, особенно во время «сухих гроз» с минимальным количеством осадков, возникающих при высокой температуре и низкой относительной влажности воздуха. Возгораниям в результате удара молнии способствует и скачок электропроводности на границе талого грунта с мерзлотой, из-за чего энергия концентрированно выделяется в узком поверхностном слое, повышая

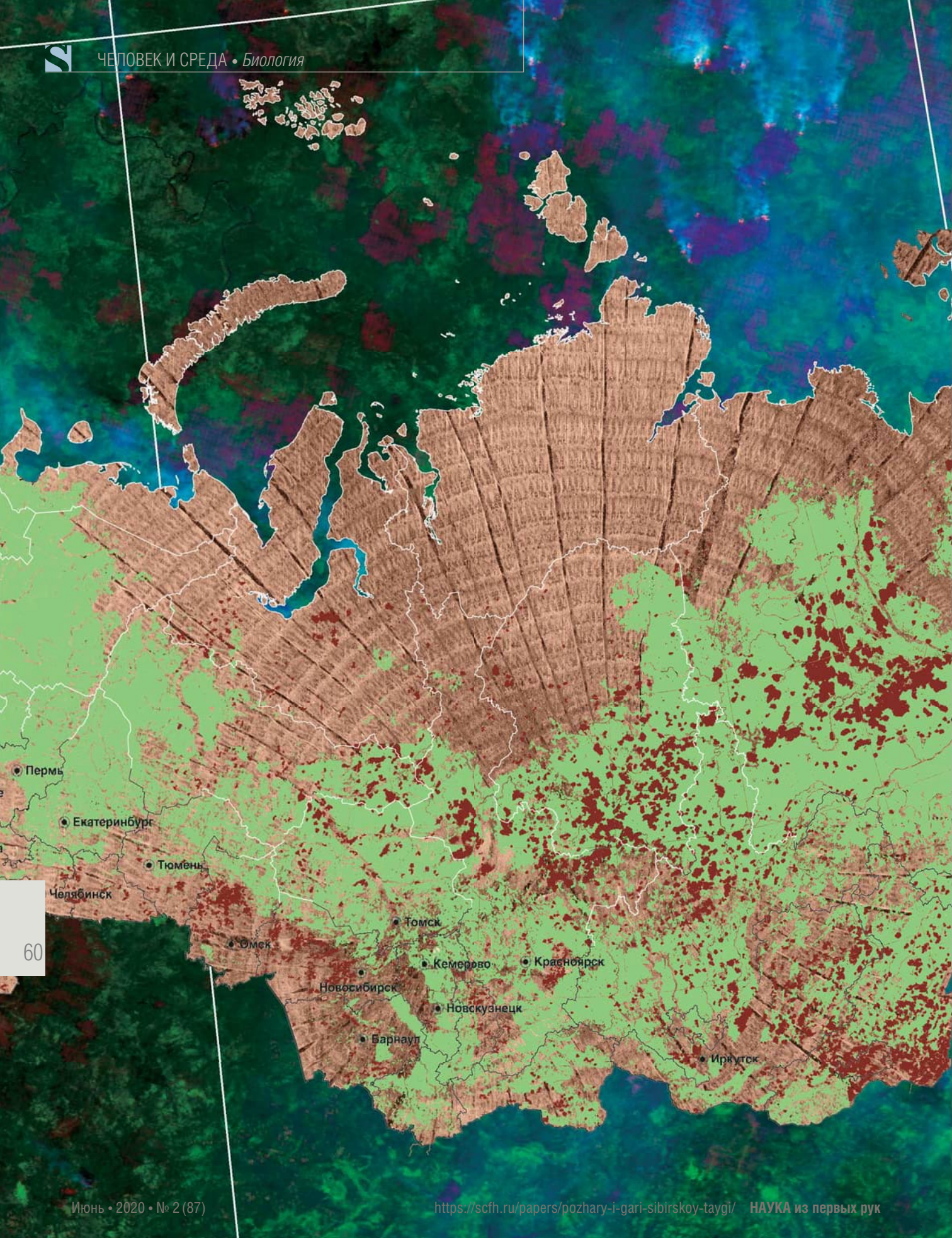


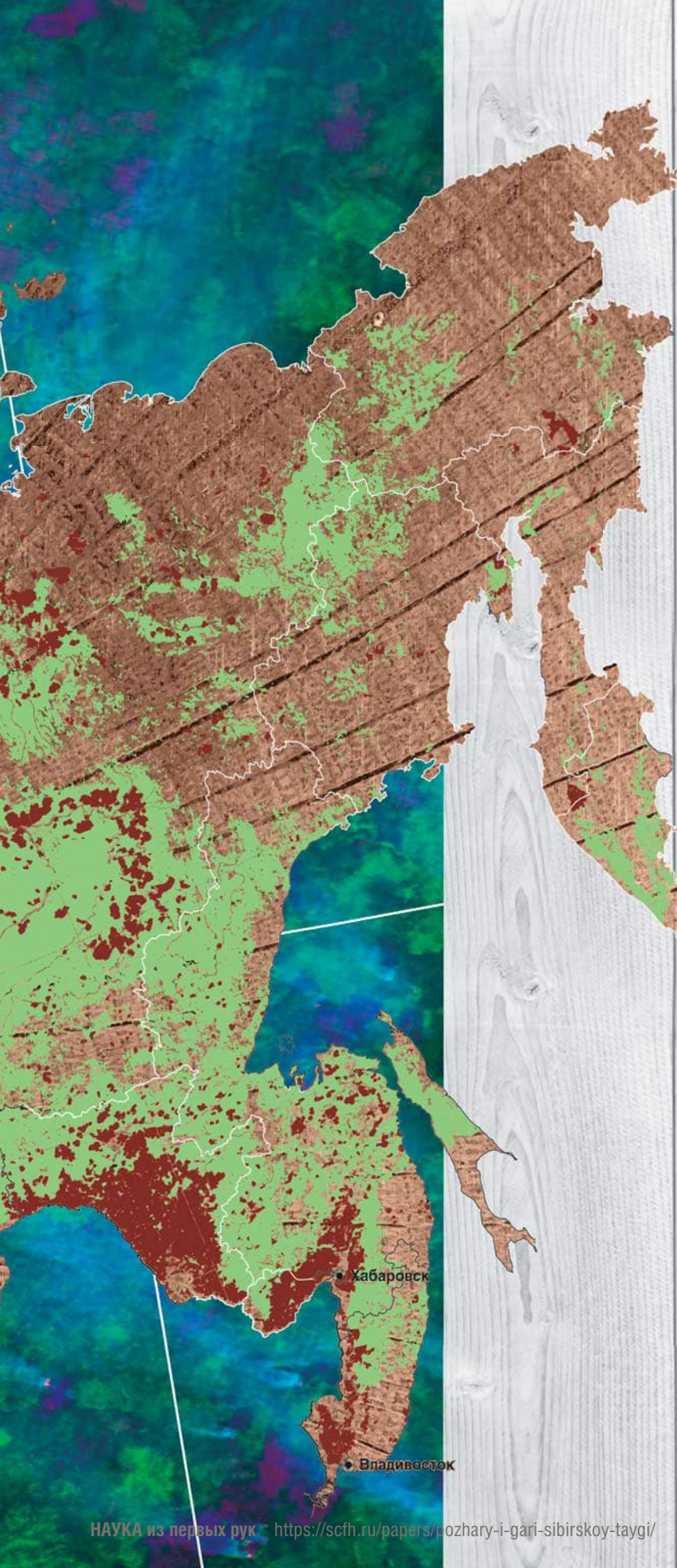
Выделяют три вида пожаров: низовой, верховой и торфяной. В большинстве своем (более 95%) лесные пожары – низовые, распространяющиеся по лесной подстилке, опад и нижним ярусам растительности. По скорости распространения и характеру горения их подразделяют на беглые и устойчивые. Первые обычны для ранней весны, когда пожарной зрелости достигают лишь верхние слои лесной подстилки, отмершей травы и опада. При таких пожарах деревья обычно не повреждаются, однако в хвойных молодняках возможен переход в верховые пожары. Устойчивые низовые пожары возникают преимущественно в летне-осенний период. При них погибает напочвенный покров и подрост, повреждаются корни и нижние части стволов. На торфяных почвах они могут переходить в торфяные пожары, а в молодняках и многоярусных насаждениях – в верховые. Верховой пожар охватывает весь полог леса. Переходу низового пожара в верховой способствуют сомкнутость древесного полога и наличие густого хвойного подроста и подлеска. Возникают верховые пожары в летне-осенний период при сильных ветрах. Огонь по пологу распространяется очень быстро, скачками со скоростью до 100 м/мин и более

вероятность возникновения пожара. Кстати сказать, потепление климата влечет за собой возрастание частоты молний на 10–12% на каждый градус (Romps *et al.*, 2014).

С продвижением в высокие широты уровень инсоляции снижается, поэтому там меньше тепла, необходимого для просушки горючих материалов до уровня воспламенения от удара молнии или искры костра, а следовательно, пожароопасный сезон короче.

С одной стороны, это влечет уменьшение числа пожаров и, соответственно, межпожарного интервала. Если в тайге междуречья Ангары и Подкаменной Тунгуски он составляет около 80 лет, то на северном пределе произрастания лиственницы – уже 300 лет. С другой стороны, с продвижением в высокие широты площади гарей возрастают: «база» горючих материалов там обширнее, а пожары, не угрожающие населенным пунктам, не тушатся.





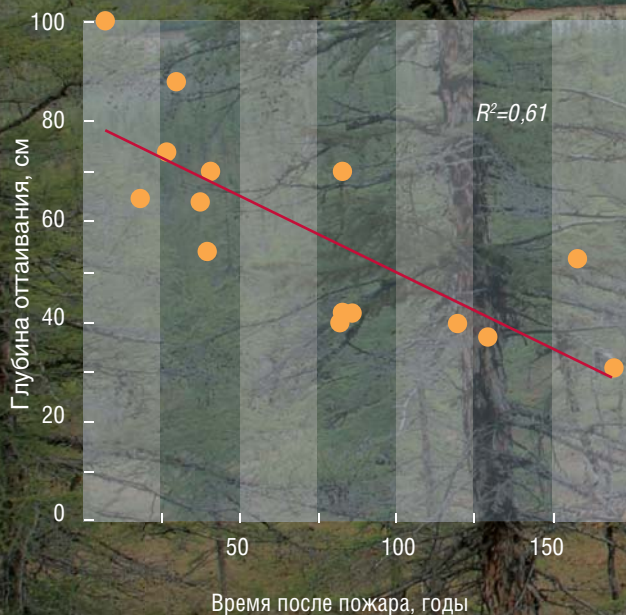
У северных пожаров есть и еще ряд отличий. Так, в средних широтах наблюдается два пика горимости: весной в начале лета и в августе-сентябре. На «северах» частота пожаров лимитируется теплом, необходимым для «созревания» горючих материалов, поэтому горимость там максимальна в середине лета.

Возникновение и развитие пожаров тесно связано с рельефом местности. От высоты над уровнем моря зависят величина осадков и температура воздуха, влияющие на горимость, а также вероятность молниевых разрядов. Пожары возникают преимущественно на южных прогреваемых склонах. В горной тайге скорость продвижения кромки огня резко (до 10 крат) возрастает на крутых склонах, чему способствуют восходящие по склонам потоки горячего воздуха.

Как феникс из пепла

Лиственница, наряду с березой, заслуживает право быть символом нашей страны, ведь лиственничники занимают более 40 % площади всех российских лесов. А в криолитозоне, характеризующейся вечной мерзлотой и неглубоким сезонно-талым слоем, лиственницами – *сибирской, даурской* и *Каляндера* – сформированы до 80 % таежных лесов.

На карте указаны площади лесов (отмечены красным цветом), пройденные огнем в азиатской части России в 2012–2019 гг. При этом надо учитывать, что при слабоинтенсивных низовых пожарах, особенно в сосняках и лиственничниках, устойчивых к действию огня, значительной гибели древостоев обычно не происходит. Реальные масштабы последствий воздействия огня можно оценить только с помощью анализа временных рядов спутниковых снимков. Карта составлена на основе данных спутникового мониторинга (Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск)



На гари со временем нарастает слой теплоизолятора – лишайниково-мохового покрова, снижающего глубину оттаивания почвогрунтов

Наибольшее воздействие на леса оказывают крупные пожары, площади которых достигают от 100 до 200 тыс. га. И хотя доля таких пожаров не превышает 8–10% от всех случаев, их площадь составляет 90% от всей охваченной огнем территории. Интенсивность пожара зависит от типа древостоя и метеословий, и в 5–15% случаях речь идет об очень сильных пожарах

Особенность лиственничников, растущих на мерзлотных почвах, заключается в том, что слой, где могут располагаться корни, со временем постепенно сужается (до 30 см и менее) из-за уменьшения глубины сезонного оттаивания. Причина – разрастание мохово-лишайниковой «подушки», прекрасного теплоизолятора. По мере подъема мерзлоты приток питательных веществ снижается и, как следствие, падает величина годовичного прироста деревьев. Наряду с этим резко уменьшается и количество подроста:



легкие семена лиственницы, зависая на слое мха, не способны при прорастании «дотянуться» до почвы.

Так, лиственничники «впадают в дрему», из которой их могут вывести только пожары. Более половины всех пожаров в Сибири возникает именно в тех лесах, где доминирует лиственница. К тому же в большей



Зона расположения корней этих выморочных лиственниц постепенно сужается в зависимости от разрастания моховой «подушки», естественного теплоизолятора. По мере подъема мерзлоты приток питательных веществ снижается, падает величина годовичного прироста деревьев. Лиственничники «впадают в дрему», ожидая следующего пожара, и разрастание мхов и лишайников, при высыхании превращающихся в прекрасный проводник горения, провоцирует его возникновение



В жестких эколого-климатических условиях криолитозоны древостои обычно разреженные, поэтому в лиственничниках преобладают низовые пожары. У лиственницы сибирской живые ткани ствола защищены от таких пожаров толстой коркой. У даурской лиственницы, преобладающей в криолитозоне, корка значительно тоньше (*вверху*). В условиях вечной мерзлоты корни деревьев зажаты в узком поверхностном сезонно-талом слое. Поэтому основным фактором гибели деревьев при низовых пожарах служит тепловое повреждение корневой системы

части этой зоны выпадает мало осадков (нередко менее 300 мм/год) и часты продолжительные засухи. Свой вклад в высокую пожароопасность лиственничников вносит мощный сибирский антициклон, при котором дожди могут не выпасть в течение месяца и более. Возникновение пожара провоцирует разрастание мхов и лишайников, при высыхании превращающихся в прекрасный проводник горения.

Важнейшее последствие этих пожаров – улучшение экологических условий для возобновления лиственницы. Источником семян становятся уцелевшие на гари деревья: даже при сильных пожарах не все лиственницы погибают, чему способствуют неоднородности рельефа и увлажненности. И даже если сам лиственничник погиб, но семена успели созреть, что возможно при осенних пожарах, то гарь обильно засеивается из упавших раскрывающихся шишек. Легкие, с «крылышками» семена лиственницы могут заноситься на гарь с неповрежденных древостоев по снегу ветром и тальми водами.

Эти семена дают обильную, быстро растущую поросль, так как почва на гари обогащена азотом,

фосфором и другими биогенными элементами, ее дренаж и аэрация лучше, а глубина сезонного оттаивания больше. Кроме того, на гарях резко улучшается световой режим за счет гибели материнского полога и выгорания живого напочвенного покрова, что важно для этого светолюбивого вида. Так что и выжившие после пожара деревья значительно увеличивают свой прирост.

Таким образом, пожары способствуют обновлению и омоложению экосистемы лиственничников. Лесоводы определяют лиственницу как *пиропитный*, т.е. «любящий огонь», вид, поскольку пожары способствуют доминированию лиственницы, особенно в условиях вечной мерзлоты. Кстати сказать, наряду с лиственницей гари криолитозоны частично возобновляются березой и ольховником. Эти виды сохраняются в лиственничниках как примесь в благоприятных местобитаниях, например в поймах рек.

К «огнелюбам» относится и *сосна обыкновенная*. При отсутствии пожаров она вытесняется на более бедные почвы и заболоченные территории другими породами, такими как ель. Как и лиственница, сосна

очень светолюбива и плохо возобновляется под пологом леса. Оба эти вида эволюционировали в условиях периодических пожаров, адаптируясь к ним и приобретая конкурентные преимущества перед другими породами.

Судя по спутниковым снимкам и наземным обследованиям, вся территория северных лиственничников, по сути, представляет собой мозаику древостоев, находящихся на разных стадиях восстановления после пожаров. И возникает вопрос: есть ли смысл повсеместно бороться с огнем в лесах, само существование которых определяется периодическими пожарами? Оправдан-

Из-за своего исключительного светолюбия лиственница очень плохо возобновляется под густым сомкнутым пологом. Сохранению в смешанных древостоях способствует долговечность этого вида: в южной тайге ее возраст достигает 600 лет, а в северной тайге встречаются долгожители возрастом до 1000 лет! У других хвойных жизнь короче: предельный возраст ели – 300–350 лет, пихты – 200–250, сосны обыкновенной и кедровой – 400–500 лет

ны ли экономически затраты на их тушение, особенно на далеких труднодоступных территориях – там, где пожары не угрожают жизни людей, их домам и промышленным объектам? В конечном итоге сработает природный «противопожарный» механизм – циклоны, несущие дожди, которые приходят на смену сухой и жаркой погоде.

Горят темнохвойные

Наибольший ущерб пожары причиняют темнохвойным лесам, сформированным кедром, пихтой и елью. Пожары в них обычно случаются реже, так как эти породы более требовательны к условиям увлажненности: в их местообитаниях осадков выпадает больше, чем там, где растут устойчивые к засухе лиственницы и сосны. *Сосну кедровую сибирскую* (в просторечии – кедр) за влаголюбие даже называют «деревом туманов».



Перестойные, плохо возобновляющиеся лиственничники Заполярья, в которых между пожарами может пройти три столетия

Однако в засушливые годы и в таких лесах площади пожаров достигают миллионов гектаров, как это случилось, например, в 2010 г. в Западной Сибири. В отличие от сосны и лиственницы, стволы темнохвойных пород слабо защищены коркой от низовых пожаров, а густая, нередко опускающаяся до земли крона, насыщенная эфирными маслами, способствует переходу низовых пожаров в опустошительные верховые. Скорость распространения последних такова, что от них едва ли спасется даже быстроногий лесной олень.

Возобновление гарей в темнохвойниках обычно идет через смену древесных пород. Вначале эти площади, как правило, захватывают осина и береза, под пологом которых селятся темнохвойные породы, способные выносить затенение, в первую очередь пихта и ель. Постепенно они продвигаются в верхний ярус леса. Береза и особенно осина являются светолюбивыми видами и под густым темнохвойным пологом не выживают.

К тому же они недолговечны: большинство осин к 80 годам практически полностью поражаются сердцевинными гнилями.

Таким образом, за сто лет мелколиственные породы обычно вытесняются коренными темнохвойными. Однако часть территории может быть надолго захвачена травами, кустарниками и той же осиной или березой. Дело в том, что разросшийся травяно-кустарниковый покров провоцирует пожары (весной сухая трава – прекрасный горючий материал), которые уничтожают подрост темнохвойных. Береза же и осина способны размножаться корневыми отпрысками. Вот в таких местообитаниях помощь человека в восстановлении темнохвойных лесов необходима.

Однако полное подавление пожаров приводит к формированию старых, ослабленных «перестойных» древостоев, которые становятся кормовой базой для короедов и других фитопатогенов. К примеру, в свое





Наибольший ущерб пожары причиняют темнохвойным лесам из кедра, пихты и ели. Вот так выглядят кедровые древостои в горах Западного Саяна после опустошительного верхового пожара

время леса западного побережья Северной Америки, сбереженные от огня, погубили жуки-короеды, превратив их в сухостой.

Чтобы избежать катастрофических пожаров и понизить уровень пожароопасности, пирологи предлагают устраивать «профилактические» пожары. При таких контролируемых выжиганиях сгорает «лесной хлам» (валежник, опад и т. п.), который при накоплении способен стать пищей для низового пожара и спровоцировать его переход в опустошительный верховой.

Метод «управляемых пожаров» требует высокого профессионализма и может быть применим только локально. Во-первых, он затратный: необходимо подготовить выбранный участок, прорубить вокруг него просеки, а затем отслеживать динамику пожара. Во-вторых, он рискованный, так как нужно точно выбрать время и погодные условия, чтобы при смене направления или усилении ветра огонь не «убежал» из зоны контроля и/или не вызвал верховой пожар. Подобное случилось, к примеру, в начале 2000-х гг. в США, когда вышедший из-под контроля пожар развернулся в сторону знаменитого Лос-Аламосского ядерного центра в Калифорнии.

Лес, согласно присловию пирологов, горел, горит и будет гореть. А в будущем, по прогнозам, гореть будет чаще и на все возрастающих площадях. Потепление в Сибири, как и во всей бореальной зоне, идет вдвое быстрее, чем в целом по планете. Это влечет усиление погодных аномалий, удлинение пожароопасного периода, а значит, возрастание частоты, интенсивности и площади пожаров.

В перспективе ожидается смещение природных зон, что приведет к изменениям показателей горимости сибирских лесов. В южной тайге это выразится в первую очередь в сокращении межпожарных интервалов, на севере – в усилении мозаичности пожарных режимов.

В целом же в ближайшие десятилетия пожарная ситуация в бореальных лесах неизбежно будет обостряться. Об этом предупреждают и наши канадские коллеги: «Необходимо принять, что в будущем площадь лесных пожаров возрастет более чем вдвое, что повлечет усиление задымленности атмосферы» (Flannigan, 2020). Густой дымный смог уже покрывает не только канадские леса, но и достигает Ванкувера, Монреаля и Нью-Йорка.

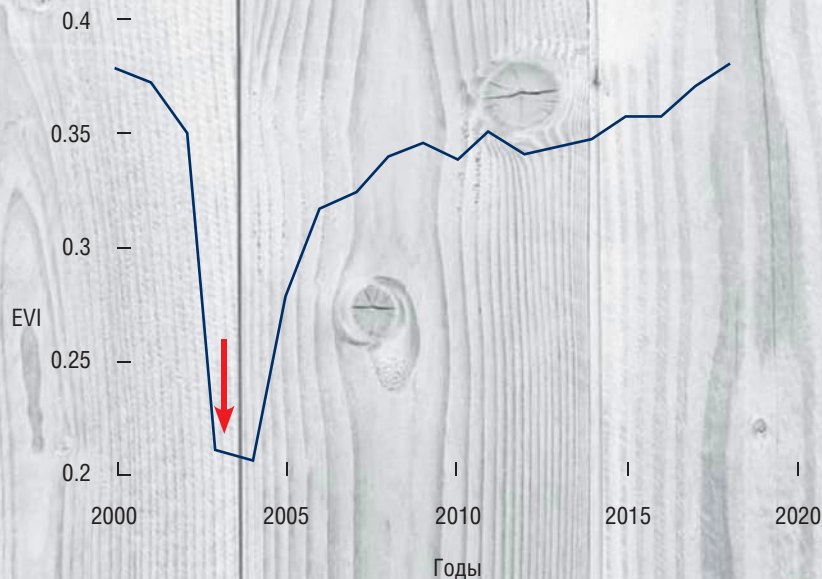
В условиях меняющихся пожарных режимов необходима разработка новой стратегии борьбы. Известно, что полное подавление лесных пожаров ведет к накоплению горючих материалов в древостоях, провоцируя возникновение катастрофических пожаров, – эффект, который пирологи называют «пожарным парадоксом». При этом снижается и разнообразие лесных ландшафтов.



Деревья, выжившие после пожара, увеличивают индекс годового прироста. Даже на широте полярного круга он может превышать средний прирост лиственницы из южной тайги (слева)



Возобновление лиственницы на гари: более 500 тыс. деревьев на гектар!
Бассейн р. Нижней Тунгуски



Динамика вегетационного индекса EVI – индикатора продуктивности растительности – для лиственничника криолитозоны. Значения этого показателя резко упали после пожаров в августе 2003 г., которые затронули 60 тыс. га. Продуктивность лиственничника восстановилась примерно за десятилетие. По данным спутниковой съемки, Terra/ MODIS

В борьбе с лесными пожарами могут помочь сами пожары, поскольку они, как ни парадоксально, не только снижают вероятность возникновения обширных интенсивных пожаров, но и способствуют восстановлению лесных экосистем – так называемый двойной пожарный парадокс. Никакие иные способы («управляемые пожары», удаление горючих материалов) не могут по отдельности поддерживать существование обширных северных лесов (Тумстра *et al.*, 2020).

В условиях потепления климата нам нужно принять тот факт, что ущерб от пожаров будет возрастать, а возможность их полного подавления – снижаться. В этой связи канадские ученые предлагают сменить существующую парадигму и допускать большее число лесных пожаров в пределах

ИЗ ИСТОРИИ ОГНЕБОРСТВА

Одно из первых в мире подразделений по авиадесантной борьбе с лесными пожарами было создано в Иркутской области в начале 1930-х гг. В дальнейшем, вплоть до перестройки, число таких подразделений увеличивалось, а территория контроля и борьбы с пожарами расширялась. В 1990-е гг. произошла деградация системы борьбы с лесными пожарами в целом и снизилось количество специализированных авиаотделений. К примеру, до сих пор не восстановлены базы авиапатрулирования в с. Байките (Подкаменная Тунгуска) и в г. Туре, столице Эвенкии. Восстановление и расширение баз авиапатрулирования, модернизация аэродромов представляются одной из первоочередных задач, чтобы не повторились ошибки тушения пожаров 2019 г., когда самолеты ИЛ-76 «возили» водопроводную (!) воду в зоны пожаров за 500–600 км от аэропорта базирования

БОРЕАЛЬНЫЕ ЛЕСА КАК «СТОК» УГЛЕРОДА

Северные леса имеют особую ценность: именно они являются для планеты одним из основных источников кислорода и «стоком», поглотителем углекислого газа. Как повлияют изменения климата и возрастание частоты пожаров на эту роль северной тайги, в том числе лиственничников?

Оказывается, с повышением горимости лесов возможен их переход из «стока» в источник углекислого газа. Такой феномен уже был зафиксирован в отдельные годы экстремальной горимости в таежных лесах Канады (IPCC, 2014). Однако потепление влечет, наряду с повышением горимости, также удлинение вегетационного периода и увеличение годового прироста деревьев, что подтверждается возрастанием валовой первичной продуктивности лиственничников на большей части их ареала. Поэтому в будущем вероятен сценарий, согласно которому роль северных лесов в связывании углерода и смягчении антропогенного воздействия на биосферу будет усиливаться.

Кроме того, в результате потепления лиственница, как и ряд других представителей древесно-кустарниковой флоры, продвигается в зону полярной тундры и, согласно прогнозам, должна выйти к побережью Ледовитого океана



обширных лесных ландшафтов. Вместо полного подавления пожаров рекомендуется вести их мониторинг, прибегая к тушению пожаров лишь в случае угрозы населению и особо охраняемым территориям. Подобная стратегия тушения пожаров на основе приемлемых рисков возможного ущерба уже реализована в провинции Саскачеван на юге Канады.

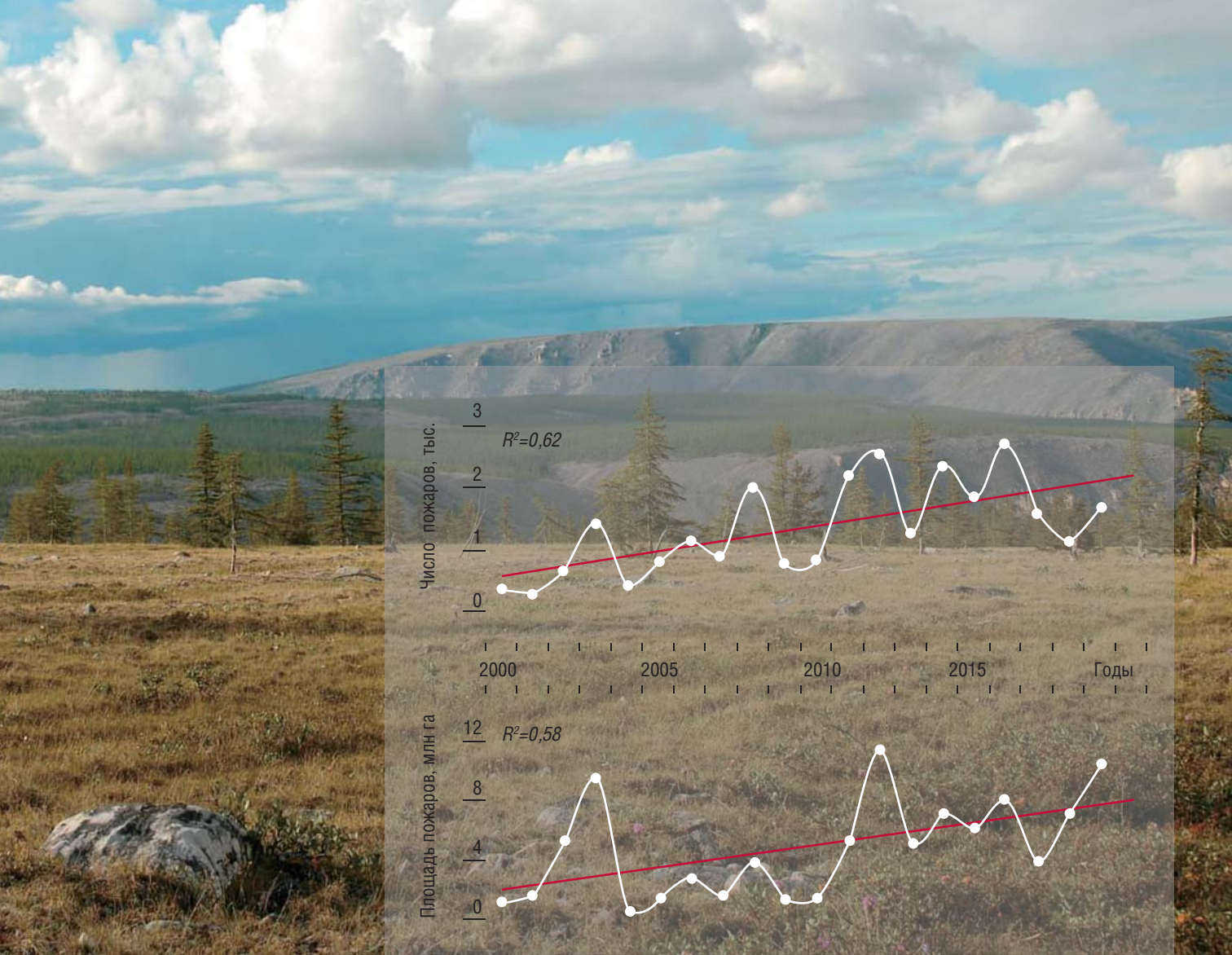
Аналогичные идеи были предложены и отчасти применены на практике отечественными учеными и инженерами. Однако в условиях меняющегося климата требуются значимые изменения в стратегии и тактике борьбы с пожарами в наших лесах, включая районирование лесных территорий по уровню предпочтения в тушении пожаров. Необходимо выделить приоритетные территории, сфокусироваться на охране территорий с высокой социальной, природной и экономической ценностью, учитывая значимость подверженных опасности лесов, включая их внеыночную стоимость, наличие индустриальной инфраструктуры и населенных пунктов, влияние задымления на здоровье людей, а также стоимость противопожарных работ.

Особое внимание следует уделить совершенствованию методов борьбы с пожарами, повышению технической оснащенности «огнеборцев», включая создание парка «самолетов-цистерн» и расширение ресурсов сети авиалесоохраны.

Но пока такой подход к проблеме возрастающей горимости лесов и рискам увеличивающихся потерь от лесных пожаров не находит должного понимания не только у политиков, но и у общественности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00432) и ККФН-РФФИ (проект № 18-41-242003)

В публикации использованы фото В. И. Харука



Подрост лиственницы
на Крайнем Севере

В XXI в. частота и площадь лесных пожаров в Сибири возрастают, что связано с потеплением и аридизацией территории.
По данным спутниковой съемки, Terra/MODIS

Литература

Барталев С.А., Стыцenco Ф.В., Егоров В.А. и др. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

Харук В.И., Пономарев Е.И. Пространственно-временная горимость лиственничников Центральной Сибири // Экология. 2017. № 6. С. 413–419.

Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L. Wildfires dynamic in the larch dominance zone // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. ARTN L01402.

Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Petrov I.A. et al. Larch Forests of Middle Siberia: Long-Term Trends in Fire Return Intervals // Regional Environmental Change. 2016. V. 16. P. 2389–2397.


Krylov A., McCarty J.L., Potapov P. et al. Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // Env. Res. Lett. 2014. V. 9. N. 105007. P. 1–8.

de Groot W.J., Flannigan M.D., Cantin A.S. Climate change impacts on future boreal fire regimes // For Ecol Manage. 2013. № 294. P. 35–44.

Wotton B.M., Flannigan M.D., Marshall G.A. Potential climate change impacts on fire intensity and key wildfire suppression thresholds in Canada // Environ Res Lett. 2017. V. 12(9).

Tymstra C., Stocks B., Cai X. et al. Wildfire management in Canada: Review, challenges and opportunities // Progress in Disaster Science. 2020. V 5. 10004.

Romps D., Seeley J., Vollaro D. et al. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming // Science. 2014. V. 346(6211). P. 851–854.



Одним из наиболее выдающихся открытий археологии XX в. стала находка погребенного в песках Южной Гоби тангутского мертвого города Хара-Хото, основанного в начале XI в. и оставленного жителями почти четыре столетия спустя. Благодаря труднодоступности древнего города в нем сохранились руины глинобитных стен и башен, святилищ и мастерских, лавок и жилых домов, а также огромное количество рукописей, предметов буддийского культа, монет и других уникальных артефактов. В настоящей статье автор рассказывает читателям о малоизвестных, но весьма интригующих обстоятельствах, связанных с этой археологической сенсацией

Ключевые слова: Центральная Азия, Монголия, Гоби, Эдзин-Гол, Хара-Хото, мертвый город, открытие, раскопки, П. К. Козлов, Ц. Бадмажапов, ИРГО (Императорское Русское географическое общество), Монголо-Сычуаньская экспедиция.

Key words: Central Asia, Mongolia, Gobi, Edzin-gol, Khara-Khoto, Dead City, discovery, excavation, P. K. Kozlov, Ts. Badmazhapov, IRGS (Imperial Russian Geographical Society), Mongolia-Sichuan expedition

АНДРЕЕВ Александр Иванович – доктор исторических наук, руководитель группы по истории исследования Центральной Азии Санкт-Петербургского филиала Института истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН. Заведующий Мемориальным музеем-квартирой П. К. Козлова (2003–2015 гг.). Член Международной ассоциации тибетоведения. Кавалер ордена Грифона (Мекленбург, Германия, 2005). Автор более 100 научных статей и 14 книг, в том числе 9 монографий



ОТ АВТОРА ВМЕСТО ПРОЛОГА

В 2006 г. в журнале «НАУКА из первых рук» (т. 11) была опубликована статья И. В. Тункиной «В поисках сокровищ богатыря Хара-цзянь-цзюнь. Неизданные труды С. И. Руденко». В этой статье автор упоминает книгу С. И. Руденко «Мертвый город древнего Тангутского царства» и вкратце рассказывает об открытии мертвого города путешественником П. К. Козловым и его бесценных находках во время раскопок. За рамками рассказа, однако, осталась история самого открытия погребенного в песках Южной Гоби мертвого города, представляющая немалый интерес. Об этом я впервые рассказал в статье «О том, как был дважды открыт мертвый город Хара-Хото», опубликованной в книге «От Байкала до священной Лхасы. Новые материалы о русских экспедициях в Центральную Азию в первой половине XX века» (1997). В статье для журнала «НАУКА из первых рук» мне хотелось бы вновь вернуться к этой теме и поведать читателю о малоизвестных, но весьма интригующих обстоятельствах, приведших к одному из главных и наиболее сенсационных археологических открытий XX в.

Мертвый город ХАРА-ХОТО был открыт дважды

*Документальное
расследование*

Развалины Хара-Хото. 2015 г.
Фото Уильяма Линдсея

«Хара-Хото ... с именем этого вечно сонного друга всегда-всегда будет связано и мое имя. Может быть, этому угасшему городу суждено будет всегда озарять мое имя географа», – с гордостью написал П. К. Козлов 4 ноября 1923 г. в дневнике своей последней Монголо-Тибетской экспедиции (Козлов, 2003, с. 66). И действительно, раскопки погребенного в гобийских песках древнего тангутского поселения, столицы государства Си Ся*, принесли всемирную известность этому русскому путешественнику, ученику Н. М. Пржевальского.

Однако до сих пор мало кто знает, что заслуга открытия Хара-Хото («Черного города»), строго говоря, принадлежит не Козлову, как это принято считать, а буряту Цокто Бадмажапову. Именно он первым обнаружил загадочные руины в низовьях р. Эдзин-Гол в Южной Монголии весной 1907 г., о чем незамедлительно сообщил в Санкт-Петербург покровительствовавшему ему Козлову. Он также направил составленное им описание развалин и пути к ним в Императорское Русское географическое общество (ИРГО). Самому же Козлову удалось впервые побывать в Хара-Хото лишь год

спустя, когда возглавляемая им Монголо-Сычуаньская экспедиция «официально» открыла мертвый город для научного мира и произвела его раскопки.

В результате лавры первооткрывателя Хара-Хото достались не безвестному Бадмажапову, а его учителю и покровителю, путешественнику-исследователю с мировым именем. Правда, впоследствии Козлов в своих публичных выступлениях отдал должное помощи, оказанной его экспедиции местными жителями, и при этом особо отмечал Бадмажапова, «много способствовавшего моей славной деятельности по открытию Хара-Хото» (Архив РГО. Д. 159. Л. 410). Однако он избегал упоминания явно неудобных для него подробностей, связанных с первым посещением развалин своим учеником.

В архиве РГО в Санкт-Петербурге сохранилось немало документов, проливающих свет на историю двойного открытия мертвого города. Это прежде всего отчет Бадмажапова с приложенными к нему первыми фотографиями развалин, а также его письма Козлову, которые сообщают нам много интересного о взаимоотношениях этих двух людей, «сооткрывателей» Хара-Хото.





Участники Монголо-Сычуаньской экспедиции.

Сидят, крайний справа

Ц. Г. Бадмажапов, слева от него П. К. Козлов. *Дин-юань-ин, 1908 г. Архив РГО. Ф. 18. Оп. 7. Д. 146*

Караван экспедиции П. К. Козлова в пустыне Гоби. 1908. *Архив РГО. Оп. 18. 7. Д. 436*

* Си Ся («Западное Ся») – великое тангутское царство (1038–1227 гг.) на территории современных китайских провинций Шэньси и Ганьсу, контролировавшее восточный отрезок Великого шелкового пути (Кычанов, 1968).

Негласный агент Генштаба

Прежде чем перейти к рассказу об этой необычной истории, следует чуть ближе познакомиться с одним из главных ее героев.

Кяхтинский бурят-казак Цокто Гармаевич Бадмажапов был приглашен Козловым в его первую самостоятельную Монголо-Камскую экспедицию (1899–1901) в качестве переводчика с монгольского языка. Он зарекомендовал себя с наилучшей стороны, что во многом определило его дальнейшую судьбу.

По окончании путешествия по протекции Козлова Бадмажапов был принят на службу в русский торговый дом «Собенников и братья Молчановы», только что созданный в пограничном г. Кяхта. Бадмажапов сопровождал торговые караваны, нередко совершал многодневные переходы по гобийской пустыне; случалось ему ездить по делам фирмы и в далекие края: Маньчжурию, восточный Китай (Пекин). Постоянным же местом его жительства был оазис Дин-юань-ин, главный город Алашанского княжества (совр. китайская провинция Ганьсу).

Впрочем, по прошествии нескольких лет Цокто заскучал, очевидно, не довольствуясь скромной ролью коммивояжера: ему с его энергией и способностями хотелось чего-то большего, как-то отличиться, выделиться из своей среды. Это настроение хорошо чувствуется в его письмах Козлову. Весной 1905 г. (Монголия в это время была взбудоражена присутствием в Урге

Далай-ламы XIII, бежавшего из Лхасы к русским границам) Бадмажапов обратился к Козлову, в то время подполковнику Главного штаба*, с довольно необычной просьбой: помочь ему «получить казенное поручение от какого-либо учреждения», ИРГО или Академии Генштаба, чтобы «доставлять нужные сведения и справки по каким-либо делам по силе своего знания, или сделать из меня какого-нибудь неофициального агента» (Архив РГО. Ф. 18, оп. 3, д. 36 (1905)).

Пробные донесения Бадмажапова, которые он посылал Козлову, отмечены наблюдательностью и способностью к анализу. Написаны они довольно гладким русским языком. В конце концов Козлову удалось заинтересовать свое начальство предложением Бадмажапова, и он был принят в число негласных агентов Генштаба.

Подробными сообщениями Бадмажапова в Петербург в первую очередь, конечно же, пользовался сам Петр Кузьмич для составления своих обстоятельных записок в Главный штаб, которые немало способствовали его авторитету эксперта по монгольско-тибетским делам. Бадмажапов также посылал донесения российскому посланнику в Пекине Д. Д. Покотилову и не менее известному дипломату И. Я. Коростовцу. В то же время

нельзя сказать, что делал он это совершенно бескорыстно, не рассчитывая на получение в будущем какого-либо вознаграждения за свое усердие.

«Я лелеял заветные мысли найти развалины города»

Но вернемся к Монголо-Сычуаньской экспедиции Козлова. Ее главные цели – исследование Средней и Южной Монголии, Кукунорской области и посещение северо-западной Сычуани (Козлов, 1923). У экспедиции, однако, были и особые побудительные мотивы. В книге-отчете о путешествии, опубликованной в 1923 г., Козлов писал: «В тайниках души я лелеял заветные мысли найти в пустыне Монголии развалины города...». И получилось так, что одна из побочных целей Козлова – поиск развалин Хара-Хото – и стала его главным триумфом (*Там же*, с. 22).

«Если говорить откровенно, – пишет Козлов в другом месте своей книги, – я не переставал интересоваться Хара-Хото, едва лишь узнал об этих развалинах из лучшей книги нашего покойного путешественника Г. Н. Потанина». В книге

Цокто Гармаевич Бадмажапов (1879–1937) – российский и советский переводчик, монголовед. Первооткрыватель тангутского города Хара-Хото. Расстрелян в 1937 г. по обвинению в участии в контрреволюционном заговоре. Архив РГО. Ф. 18. Оп. 7. Д. 172

* Главный штаб – высший орган военно-стратегического управления Вооруженных сил Российской империи. В его ведении, помимо прочего, находились все военно-топографические и военно-статистические работы



Петр Кузьмич Козлов (1863–1935) – русский путешественник, военный географ, этнограф, археолог. Ученик и соратник Н. П. Пржевальского. В 1883–1926 гг. совершил шесть больших экспедиций в Монголию, Западный и Северный Китай, Восточный Тибет, три из них возглавил лично, включая Монголо-Сычуаньскую (1907–1909), во время которой были проведены первые раскопки Хара-Хото. Архив Музея-квартиры П. К. Козлова



«Тангутско-тибетская окраина Китая и Центральная Монголия» Потанин, ссылаясь на местные предания, упоминает развалины «города Эрге-хара-бурюк, которые находятся в одном дне езды к востоку от Кунделен-гола, т. е. от самого восточного рукава Эдзина; тут, говорят, виден небольшой *кэрим*, т. е. стены небольшого города, но вокруг много следов домов, которые засыпаны песком. Разрывая песок, находят серебряные вещи. В окрестностях *кэрима* большие сыпучие пески и воды близко нет» (Потанин, 1893, с. 464).

Сведения Потанина, относящиеся к 1886 г., позже подтвердил другой русский путешественник – В. А. Обручев: «По словам торговцев, за последним рукавом Эдзин-Гола – Кунделен-голом – среди песков расположены остатки большого города, когда-то получавшего воду из Эдзин-Гола, который давно уже отошел от него» (Обручев, 1901, с. 399–400).

Однако ни Потанин, ни Обручев не пытались отыскать мертвый город и ограничились лишь расспросами о нем местных жителей. Сообщенные в их книгах сведения Козлов взял на заметку и еще во время первой экспедиции в свою очередь пытался разузнать

что-нибудь о мертвом городе. Но А. Н. Кознаков, посланный им на разведку в 1900 г., вернулся ни с чем. Туземцы в один голос отрицали существование каких бы то ни было развалин в окрестности, замечая: «Вы, русские, хотите знать больше нас даже о наших местах» (Козлов, 1923, с. 75).

И вдруг – неожиданная удача. В очередном письме от Бадмажапова, датированном 15 мая 1907 г., Козлов читает: «Я во время своей поездки в Эдзин-Гол сделал весьма интересное открытие, по крайней мере, я так думаю. Около песков между долинами Гойдза и Эдзин-Гол наткнулся на развалины Фара-Фото или Хара-дайшин, где специально дневал, сделал снимки и кое-что записал» (Архив РГО. Ф. 18, оп. 3, д. 36 (1907), л. 10 об.).

К своему письму Бадмажапов приложил четыре снимка развалин, просил показать их вице-председателю ИРГО П. П. Семенову-Тянь-Шанскому, а также сообщить ему о своих планах «написать маленькую брошюру о своей поездке к развалинам». Можно представить себе, с каким трепетом Козлов читал эти строки. И сколь неодолимым было его желание как можно скорее отправиться в Монголию, чтобы увидеть воочию развалины таинственного города, о котором писал еще Марко Поло! А тем временем полным ходом шла подготовка к его новой большой экспедиции в Центральную Азию.

«...страшно обидно то, что открывши Хара-Хото, и остаться виновным»

О своем посещении Хара-Хото Бадмажапов сообщил не только Козлову, но и непосредственно Семенову-Тянь-Шанскому в ИРГО, а также в Главный штаб. В архиве Общества, как уже говорилось, сохранилась присланная им рукопись, озаглавленная «Тридцатипятидневная поездка от резиденции князя Алаша-Вана до ставки князя Торгоуд-Бэйле», вместе с приложенными к ней изрядно выцветшими 13 фотографиями (Архив РГО. Р. 97, оп. 1, д. 30).

В сопроводительном письме на имя главы ИРГО от 25 ноября 1907 г. Бадмажапов писал: «Если это краткое описание заслуживает внимания Географического Общества, то покорнейше прошу Ваше Превосходительство распорядиться напечатать отдельными брошюрами с теми же приложениями [фотоснимками] и послать мне несколько десятков экземпляров. В случае негодности для печати не откажите благоволить переслать оригинал мне обратно» (*Там же*, лист без номера).

В Хара-Хото Бадмажапов побывал дважды: 20 и 24 апреля, на обратном пути в ставку алашанского князя. Во второй раз – специально с целью фотографирования развалин. Из 13 сделанных им в дороге снимков четыре запечатлели руины крепости и один из *субурганов* – холмообразных буддийских ступ-реликвариев. При этом поражает скрупулезность, с которой бурятский коммерсант описывает дорогу в мертвый город, перечисляя все без исключения встретившиеся ему попутные ключи и колодцы. С такой информацией отыскать Хара-Хото, разумеется, не представляло большой сложности.

Судя по рассказу Бадмажапова, находка не была случайной. Можно предположить, что, зная о предстоящей экспедиции Козлова, он умышленно повел караван через низовье Эдзин-Гола, предварительно добыв у своих алашанских друзей более или менее точные «координаты» развалин.

Письмо Бадмажапова с известиями о сделанном им открытии, несомненно, дало дополнительный мощный импульс экспедиционным планам Козлова. Правда, сам путешественник не стремился раньше времени афишировать свои намерения, связанные с поиском Хара-Хото. И все-таки перед отъездом он доверил некоторым друзьям свой «затаенный план», о чем мы знаем из его книги-отчета о путешествии. Возможно, знал об этом плане и император, 5 июля 1907 г. удостоивший Козлова особой аудиенции, где окончательно решил вопрос о финансировании Монголо-Сычуаньской экспедиции. Николай II, являвшийся покровителем ИРГО, распорядился перевести

на ее счет 30 тыс. рублей – средства, первоначально пожертвованные им еще в 1903 г. на несостоявшуюся Месопотамскую экспедицию.

Когда именно ИРГО и Главный штаб получили послание Бадмажапова, мы не знаем, но, по-видимому, это произошло еще в начале 1908 г. Кажется, что Бадмажапову очень хотелось, чтобы в Петербурге о его замечательном открытии узнали еще до того, как Козлов приведет свою экспедицию в мертвый город. И не просто узнали, но и «напечатали» его рассказ о поездке в Эдзин-Гол.

Однако честолюбивые помыслы бурятского «исследователя» не встретили понимания со стороны петербургских ученых, да и сам Козлов, насколько известно, не сделал ничего для опубликования рукописи своего ученика. Но это и понятно, ведь такая публикация означала бы признание первенства Бадмажапова в открытии Хара-Хото, что, естественно, умалило бы заслуги в этом отношении ИРГО и самого Козлова.

Разумеется, Бадмажапову подобные соображения не приходили в голову, потому он настойчиво продолжал добиваться своего. Так, в письме от 4 октября 1908 г., т. е. уже после того как Козлов, по его собственному выражению, «фактически открыл» мертвый город, Бадмажапов вновь просит Козлова: «Напишите, пожалуйста, если можете, в Географическое Общество относительно описания моей поездки на Эдзин-Гол – пусть напечатают [его]» (Архив РГО. Ф. 18, оп. 3, д. 36 (1907), л. 7 об.).

Спустя некоторое время Бадмажапов вновь обращается с той же просьбой в ИРГО и Главный штаб, наивно надеясь, что в Петербурге в конце концов оценят по достоинству оказанную им услугу науке. Но этого не случилось. Напротив, из обоих учреждений последовала суровая отповедь: его притязания сочли неуместными теперь, когда всему миру было известно, что Хара-Хото открыл Козлов.

19 декабря 1909 г. обескураженный Цокто пишет Козлову: «Я удивляюсь, почему Географическое Общество выражает неудовольствие мне, и в чем Штаб находит большую нетактичность. Я совершенно не понимаю, и, кроме того, Вы помните, что как будто бы я написал что-то такое помимо Вас. Разве только то, что *я открыл Хара-Хото и дал первый толчок к изучению Хара-Хото* [курсив мой – А. А.]; если это так, то я в скором времени непосредственно напишу в Совет Географического Общества, что мною были посланы сведения и снимки Хара-Хото на имя Председателя не с какою-то корыстной целью, а просто заинтересовать Общество и также Штаб. Мне теперь страшно обидно то, что открывши Хара-Хото, и остаться виновным, потому искренне прошу Вас написать мне, в чем дело и за что винят меня. Я думаю, получив от Вас ответ, непосредственно снести с Советом. Все-таки, мне кажется,

я же представил Обществу первые фактические данные о злополучном Хара-Хото; если теперь Общество выражает мне же неудовольствие, то мне одно остается, что писать во все газеты относительно предоставления моих сведений в Географическое Общество, и вообще, вероятно, кто-нибудь поможет мне составить статейки» (Там же, д. 36 (1909), л. 1, 1 об.).

Эти резкие слова Бадмажапова говорят о многом. В них и обида на ИРГО и Главный штаб, и косвенный упрек самому Козлову.

Второе «открытие» Хара-Хото

Теперь рассмотрим, как совершил свое открытие Хара-Хото П. К. Козлов.

Из Петербурга путешественник выехал с большим опозданием: не в июле, как предполагалось вначале, а 18 октября 1907 г., на следующий день после еще одной аудиенции у императора. В своем путевом дневнике Козлов откровенно признается, что мысли о Хара-Хото занимали его всю дорогу от Петербурга до Урги.

Весьма возможно, что Бадмажапов снабдил путешественника более точной информацией относительно местонахождения мертвого города, чем та, которая содержалась в его письме из Алашани, поскольку был лично заинтересован в том, чтобы Козлов побывал в Хара-Хото и подтвердил правдивость его сообщения. Это, несомненно, придавало Козлову уверенность в успехе его поисков, которые внешне, однако, выглядели вполне самостоятельными. Козлов беспрестанно расспрашивал местных жителей о месте расположения развалин города и пытался найти проводников, которые согласились бы отвести его туда. Особенно большую помощь в этом ему оказывал младший брат Бадмажапова, выступавший не только в роли конвоира, но также переводчика и посредника при переговорах Козлова с местным начальством.

Большую помощь Козлову в отыскании пути в Хара-Хото оказали два местных князя, через владения

Развалины Хара-Хото. 2015 г.
Фото Уильяма Линдсея





Сановный гость П. К. Козлова – Хагочин-торгоут-Даши-бэйлэ, полное название титула местного управителя у торгоутов, со своими чиновниками. 1908 г. Архив РГО. Ф. 18. Оп. 7. Д. 1126

которых проходил экспедиционный отряд Козлова. У Балдын-цзасака, чья ставка находилась за хребтом Гурбун-сайхан, Козлов после десятидневного отдыха получил проводников и вьючных животных для перехода в соседние владения *торгоут-бэйле*, князя эдзин-гольских монголов-торгоутов. Ставка последнего располагалась вблизи (около 20 верст) от мертвого города. Торгоут-бэйле также дал Козлову верблюдов и проводника, который в конечном счете и привел экспедицию в Хара-Хото.

Биографы Козлова отмечают особую ценность информации Балдын-цзасака. Так, С. В. Житомирский (1989, с. 92), например, утверждает, что он «оказал науке неоценимую услугу, рассказав Козлову о мертвом городе Хара-Хото». В чем же была причина столь необычайного расположения монгольского князя к русскому путешественнику? В своем дневнике Козлов рассказал почти анекдотичную историю о том, как он вылечил князя, мучившегося болью в спине, велев поставить ему горчичник. Поправившись, Балдын-цзасак стремился всячески выразить свою благодарность Козлову.

Но, скорее всего, дело было все же не только в чудесном излечении князя. Из писем Бадмажапова Козлову мы узнаем, что Балдын-цзасак желал получить высокую награду, «гунское достоинство» (*гун* – наследственный знатный титул в Монголии). В дневниках Козлова мы также находим любопытную запись: «Прямым и косвенным образом Балдын-цзасак дал понять мне, что ему было бы лестно, служа второй раз русской экспедиции, получить почетное поощрение, вроде, например, производства в *улусун-туши гун*’ы, что увеличило бы его материальное положение» (Козлов, 2015, с. 58–59). В этом новом звании, поясняет Козлов, князь будет получать втрое больше, чем в звании цзасака. Таким образом, услуга, оказанная Балдын-цзасаком русской экспедиции, была далеко не бескорыстной.

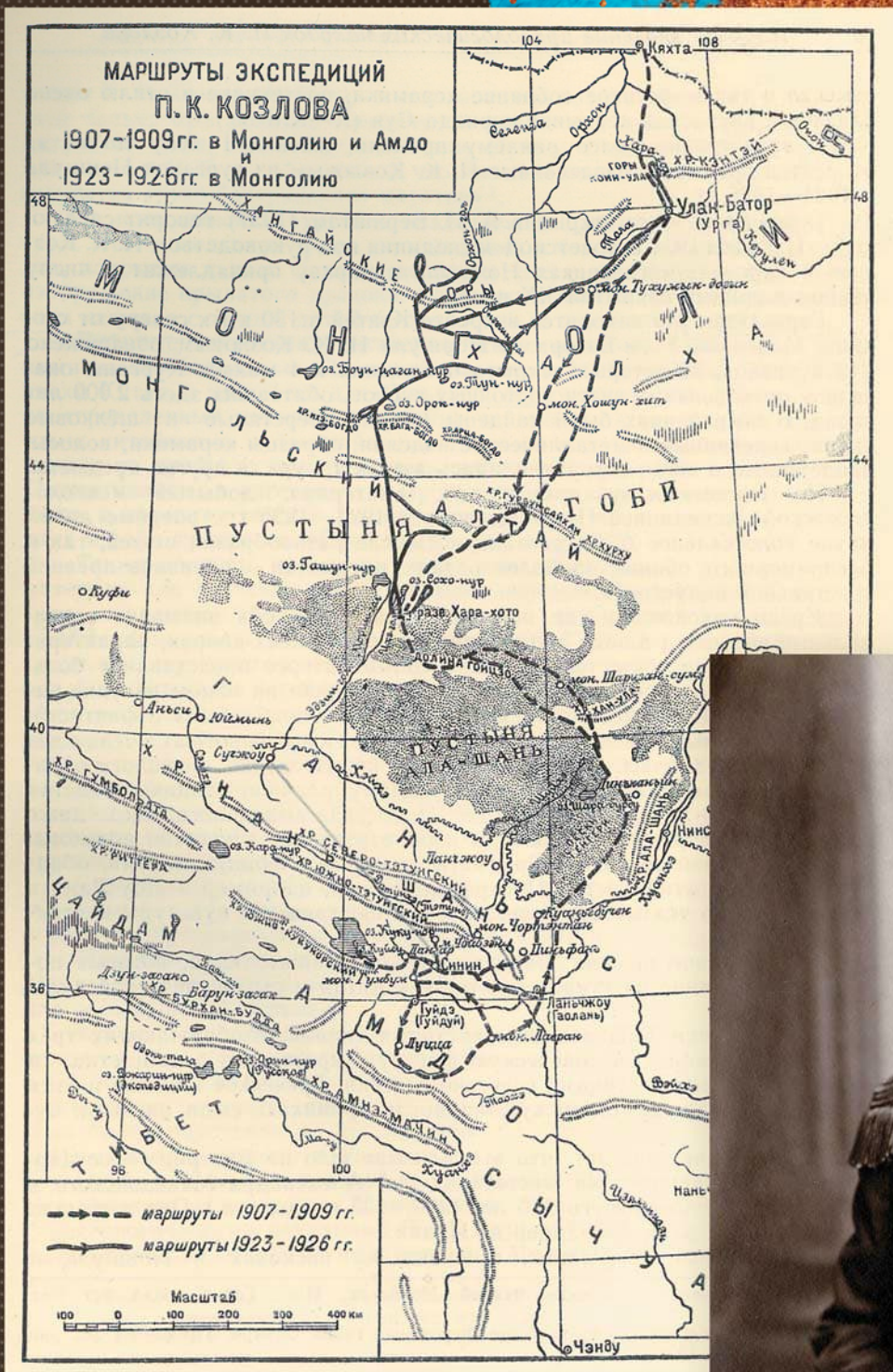
Покинув владения князя, экспедиция продолжила движение в юго-западном направлении. По рассказу Козлова, провожавший его князь шепнул ему на ухо при прощании: «Я уверен, что ты попадешь в Хара-Хото и найдешь там немало интересного».

По мере продвижения к Эдзин-Голу Козлов, как уже говорилось, не упускает возможности собрать дополнительные сведения о мертвом

городе, расспрашивая местных жителей, и даже пытается привлечь их к предстоящим раскопкам, предлагая хорошую плату. Однако желающих участвовать в раскопках не находится. Многие боялись даже близко подходить к развалинам, считая это место небезопасным.

Наконец, преодолев трехсоткилометровое расстояние, караван экспедиции располагается на стоянку у оз. Сого-Нор, куда впадает восточный рукав Эдзин-Гола. Отсюда до Хара-Хото рукой подать, однако Козлов не торопится: четыре дня путешественники будут стоять у озера «среди ликующей весенней природы», а тем временем юный Гомбо Бадмажапов будет вести переговоры с торгоут-бэйле.

В своем дневнике Козлов об этой встрече рассказывает так: «Бадмажапов съездил к торгоут-бэйлэ, который вначале принял вид надменный, но, затем, оттаял и стал человеком – обо всем выслушал и на все дал уверения: “не печальтесь и не сомневайтесь”. Дал Бадмажапову полицейского проводника с наказом доставить нас в соседство его ставки Даши-обо на левом берегу Морин-Гола. Относительно посещения развалин Хара-Хото,



Карта маршрутов экспедиций П. К. Козлова. Из книги П. К. Козлова «Монголия и Амдо и мертвый город Хара-Хото». М.: ОГИЗ, 1948. С. 15

П. К. Козлов – полковник Генерального штаба. 1912 г. Архив Музея-квартиры П. К. Козлова



проводников и всего прочего бэйлэ дал положительный ответ. Мне, конечно, были присланы вежливые выражения почтительного приветствия» (Там же, с. 71).

Метаморфоза, происшедшая с торгоутским князем, легко объяснима: за оказанную им услугу он получил богатые подарки и значительную сумму в деньгах.

Уж очень удачно складывалось все для Козлова на этом этапе экспедиции. Конечно, наличие проводников

**ОТРЫВОК ИЗ ДНЕВНИКА
П. К. КОЗЛОВА, 1908 Г.**

«Не знаю, как будут удачны мои снимки, я фотографировал и с внешней, и внутренней стороны. Фотографировалась и зарисовывалась в отдельности и находящаяся одиноко (с юго-запада) магометанская постройка, что-то вроде мечети... Восточные ворота, выводящие за стену, на пригороды, на развалины домов и субурганов, устроены как и западные, но не строго одни против других: западные ближе к южной стене, восточные к северной. Х.х. [Хара-хото] омывался двумя рукавами речек, с северной и южной стороны, сливающихся затем в северном направлении в одно русло.



За интересным делом, за всякого рода наблюдениями, время бежало страшно быстро. Сокровища наши обогащались с каждым последующим часом. Наши проводники, глядя на нас, на наши поиски и успехи, отбросили страх и начали помогать нам фактически. С сумерками активная наша деятельность прекращалась. Мы работали на Х.х. пассивно, записывали, кое-что укладывали, делали обобщения, где лучше на следующий день производить раскопки. Каждый,

по возможности, намечал себе район и в нем без устали рылся, копался, разглядывал...

Настал и день предполагаемого отъезда! Но жаль было расстаться с “нашим” Хара-хото, как стали мы его называть; мы успели познакомиться, свыкнуться с ним, с его скрытыми тайнами; между ним и нами установилась связь, связь духовная тесная.

По некоторому обсуждению А. А. Чернов остался с Мадаевым еще на двое суток; я уехал с Напалковым и Ивановым с проводниками и животными в главный бивуак. Там предстояло свидание с Торгоутским бейлз и производство астрономических работ. На бивуаке нашем оказалось все благополучным и люди наши с живым нетерпением ожидали нашего возвращения, нашего результата...

Интересно, накануне, за вечерним общим чаепитием, я попросил балдын-цзакс[кого], ламу, погадать нам о завтрашнем дне, т.е. о 21-ом марте. Он сжег можжевельник, помолился, почитал вслух молитвы, затем принялся за гадание, результатом которого было предсказано: “1) необычайная, интересная находка Мадаева и 2) добыча путем охоты зверя на пути к дому (что я убью, по дороге, дзерена)”. Точь-в-точь так и случилось: Мадаев и Напалков наткнулись на богатую находку в субургане А., а я, действительно, на пути к главному бивуаку убил отличного самца хара-сульту...»

Архив РГО. Ф. 18. Оп. 1. Д. 154–157

Развалины Хара-Хото. 2015 г.
Фото Уильяма Линдсея





Статуя и голова Будды. Найдены П. К. Козловым в ходе раскопок Хара-Хото в 1926 г. во время Монголо-Тибетской экспедиции. (1923–1926). *Дневники Монголо-Тибетской экспедиции. 1923–1926. Редактор-составитель Т. И. Юсупова, составитель А. И. Андреев. СПб., Наука, 2003*

«Знаменитый» субурган вне крепостной стены Хара-Хото. *Внизу* – до начала раскопок (июнь, 1909), *справа* – после. В этом субургане – буддийском памятнике-реликварии в виде башни – в конце раскопок было обнаружено множество керамических скульптур с позолоченными лицами. *Архив РГО. Ф. 18. Оп. 7. Д. 1120, Д. 1127*





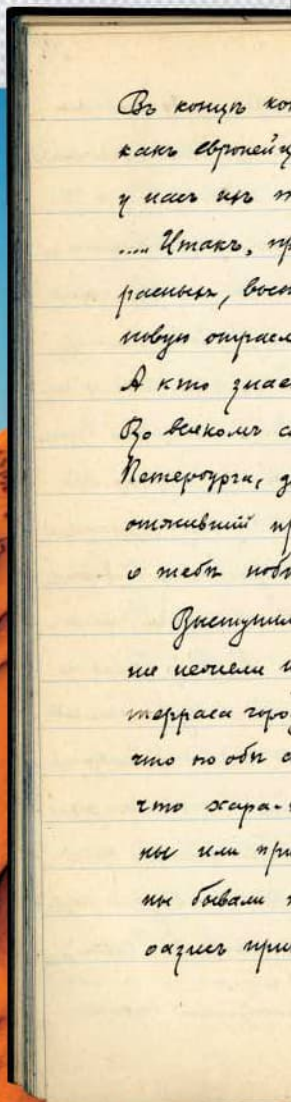
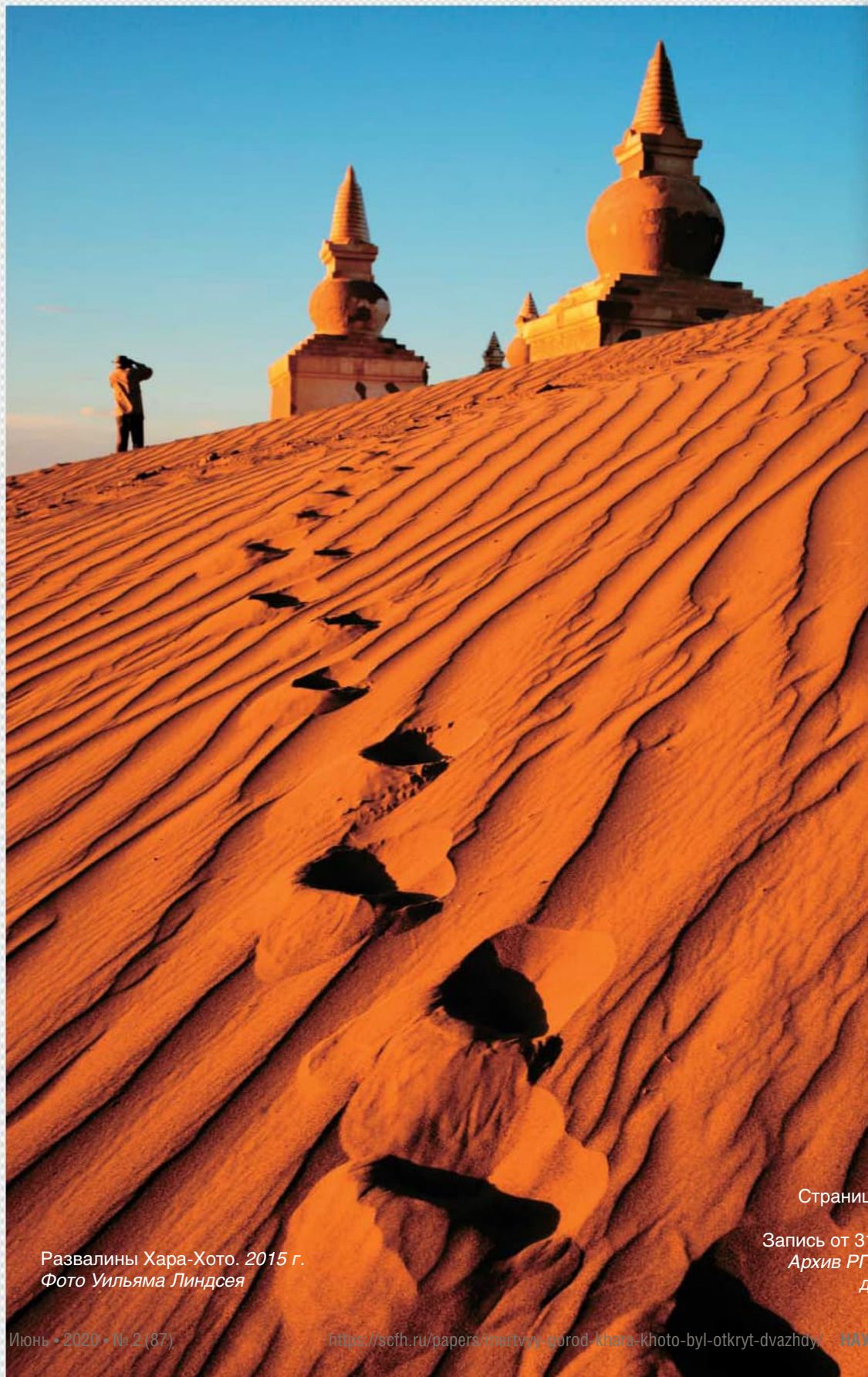
Хара-Хото
 Знаменитый субургань. Статуи на дне субургана
 Монголо-Синцзянская экспедиция Императорского Русского
 Географического Общества под начальством А.А. Козлова (1907-1909г.)

значительно облегчало задачу путешественника, но не менее важным было и другое – внутренняя уверенность путешественника в том, что он непременно достигнет своей цели, таинственного Хара-Хото. И эта уверенность, очевидно, жидилась на сведениях, полученных от Цокто Бадмажапова, а не на «попутных расспросах» или скупой информации Балдын-цзасака. Именно осведомленность Козлова была верным залогом успеха его экспедиции. Не следует забывать и о том, что все переговоры велись через Бадмажапова-младшего, действовавшего в интересах не только Козлова, но и своего брата, имя которого было хорошо известно в этих краях.

Наконец, 19 марта 1908 г. давнишняя мечта Козлова сбылась. Налегке, захватив с собой лишь небольшой запас воды, продовольствия и инструментов, необходимых для раскопок, он в сопровождении четырех

спутников и двух проводников отправляется в Хара-Хото! Ведет их к развалинам Бата – «отличный проводник» торгоутского князя, не раз побывавший в мертвом городе и слышавший немало рассказов о нем из уст отца и других стариков-туземцев. При этом он выбирает кратчайшую дорогу, ведущую к мертвому городу.

Целых три дня отряд Козлова проведет на развалинах – все это время всецело будет посвящено раскопкам. «С самого приезда мы сразу не могли урновеситься – брались за одно, за другое, за третье, жадно схватывали то один найденный предмет, то другой. Копали, рыли, ломали, рушили, бродили по поверхности. К вечеру наша большая палатка уже представляла маленький музей, мал<ое> собрание предметов Хара-Хото. С истинным удовольствием и глубоким интересом мы рассматривали все найденное. Не забуду той счастливой



Развалины Хара-Хото. 2015 г.
Фото Уильяма Линдсея

Страницы из дневника
П. К. Козлова.
Запись от 31 марта 1908 г.
Архив РГО, Ф. 18, оп. 1,
д. 154. Л. 86–87

...иногда, или такие острова считают свои впады,
а, не такими ни мостками, а едками:
Урги-четыре; пришло дов. много писем...
Прощай Хара-хото! Ты дал мне много прекрасных
минут, ты, невольно, открыл мне
новую отрасль занятий, новую пылкость,
новую пытливость...
какая б.и. еще великая радость впереди...
...о тебе говорилось много - начиная с самого
Петербурга; везде ты занимал меня. Прощай, отживший
приятель, ты, раньше других воскресший и память по тебе
побежит по всему ученому миру.
...в теплое, ясное состояние воздуха. Еще больше
прежде, я стал уверен в том, что островная
терраса кругом омывалась водами Нань-шаня;
что по обе стороны текли бол[ьшей] или мен[ьшей] мощности речки,
что хара-хотосцы часто запасали воду в большие сосуды
или при своих поездках по соседней пустыне принуждены
были брать такие запасы с собою. Особенно широкий
оазис пригород распространился к западу, а к востоку
население Хара-хото занимало всю внекрепостную террасу;
на этой террасе еще стоят открытыми такие же развалины
построек, какие мы находим и внутри крепости...

...лене Хара-хото занимало всю внекрепостную террасу; на
террасе еще стоят открытыми такие же развалины построек,
какие мы находим и внутри крепости...

Настоящее русло, прежнее русло с востока-юга-востока или
точнее с юго-востока, выражено явственно; с течением
времени здесь образовались те породы растений [тамариск, саксаул]
которые имеют способность достать себе питание - влагу
со значительной глубины... они поднялись словно на пустынную,
пестро-каменистую, скатерть, с которой, вскоре, [по
миновании двух-трех логов, направлявшихся, как и рукава
Хара-хотской реки от юга к северу], увидели "цонджи" - глинобитные
башни-маяки, отчасти напоминающие таковые, устроенные
современными китайцами в Кашгарии. Башни эти имели назначение
служить придорожными знаками-указателями с одной стороны по
"исторической" дороге к Желтой реке (а впоследствии) к Динь-юань-ину
[Алаша-ямю]

«... Итак, прощай Хара-хото! Ты дал мне много прекрасных, восторженных минут, ты, невольно, открыл мне новую отрасль занятий, новую пылкость. А кто знает - какая, быть может, еще великая радость впереди... Во всяком случае, о тебе говорилось много - начиная с самого Петербурга, дороги и Урги; везде ты занимал меня. Прощай, отживший приятель, ты, раньше других воскресший и память по тебе побежит по всему ученому миру.

Выступили в теплое, ясное состояние воздуха. Еще больше нежели прежде, я стал уверен в том, что островная терраса города кругом омывалась водами Нань-шаня; что по обе стороны текли бол[ьшей] или мен[ьшей] мощности речки, что хара-хотосцы часто запасали воду в большие сосуды или при своих поездках по соседней пустыне принуждены бывали брать такие запасы с собою. Особенно широкий оазис пригород распространился к западу, а к востоку население Хара-хото занимало всю внекрепостную террасу; на этой террасе еще стоят открытыми такие же развалины построек, какие мы находим и внутри крепости...

Настоящее русло, прежнее русло с востока-юга-востока или точнее с юго-востока, выражено явственно; с течением времени здесь образовались те породы растений (тамариск, саксаул), которые имеют способность достать себе питание - влагу со значительной глубины, они приспособились, живя в песках и пыли.

За руслом, круто обставленным с обоих берегов (в обрывах или сами обрывы состоят из ханхайских отложений то серых, то красных) мы поднялись, словно на пустынную, пестро-каменистую, скатерть, с которой, вскоре (по миновании двух-трех логов, направлявшихся, как и рукава Хара-хотской реки от юга к северу), увидели "цонджи" - глинобитные башни-маяки, отчасти напоминающие таковые, устроенные современными китайцами в Кашгарии. Башни эти имели назначение служить придорожными знаками-указателями с одной стороны по "исторической" дороге к Желтой реке (а впоследствии) к Динь-юань-ину (Алаша-ямю)»



88

минуты, когда я взошел с кайлом на вершину разв<алин> и после нескольких ударов увидел рукописи, бурханы (иконопись) и проч. Ко мне явились другие сочлены экспедиции и, роясь в соседних комнатах, также вознаграждались успехами (большими или меньшими). Конечно, всего интереснее рукописи – это документы своего рода» (Козлов, 2015, с. 78).

Уже покидая 29 марта Эдзин-Тол, Козлов не устоит перед соблазном вновь посетить мертвый город, и опять он и его помощники будут лихорадочно копать пески, «пытать счастья». Расставаться с Хара-Хото («нашим Хара-Хото», как его теперь называет в дневниках Козлов) никому не хотелось. В дневнике Козлова мы читаем: «Итак, прощай Хара-Хото! Ты дал мне

много прекрасных, восторженных минут, ты, невольно, открыл мне новую отрасль занятий, новую пылливость. А кто знает – какая, может быть, еще великая радость впереди...» (Там же, с. 86–87).

«Бадмажапов оказал экспедиции ценные услуги...»

Посещение Хара-Хото действительно стало «звездным часом» для путешественника. Все собранное им во время предварительных раскопок (основные работы начнутся лишь в мае 1909 г., на заключительном этапе экспедиции) – книги, бумаги, украшения, предметы буддийского культа, наполнившие 10 пудовых ящиков, – было без промедления отправлено в Петербург, ИРГО и Академию наук. Кроме того, «пользуясь хорошим дружелюбным отношением к экспедиции торговца-бэйле, – пишет он, – я тотчас же отправил монгольской почтой в Ургу и далее в Петербург, в нескольких параллельных пакетах, известия о фактическом открытии Хара-Хото» (Козлов, 1923, с. 81). Это письмо на имя секретаря Общества А. В. Григорьева, датированное 28 марта 1908 г., было опубликовано в «Известиях ИРГО».

Находки из Хара-Хото вместе с другими материалами Монголо-Сычуаньской экспедиции были доставлены в Петербург осенью 1909 г. и размещены в только что отстроенном новом здании Географического общества, где тогда же началась их обработка. По просьбе

Фото П. К. Козлова в кресле на выставке находок из Хара-Хото в Императорском Русском географическом обществе (ИРГО).

Фото С. М. Прокудина-Горского. Февр. 1910. Архив РГО. Ф. 18. Оп. 7. Д. 79



Лестница в здании ИРГО
с экспонатами выставки.
Фото К. К. Буллы.
Архив РГО. Ф. 18. Оп. 1. Д. 1221



Во время раскопок в Хара-Хото экспедиция П. К. Козлова обнаружила рукописи на китайском, уйгурском и тогда еще неизвестном языке «си ся» (тангутском). Только в одном из субурганов была найдена целая библиотека – более 6 тыс. прекрасно сохранившихся экземпляров! Среди находок – ассигнации Минской династии (первые дошедшие до нас бумажные деньги), сотни буддийских икон и скульптур и множество других религиозных и бытовых предметов. Загруженный до предела караван не мог увезти с собой все находки, поэтому Козлов оставил на месте часть вещей, главным образом крупную скульптуру, предполагая организовать еще одну экспедицию

Козлова в атрибуции буддийских предметов принимал участие хамбо-лама Агван Доржиев, посланник тибетского Далай-ламы, находившийся в то время в Санкт-Петербурге. «Надеюсь употребить все мои усилия к тому, чтобы разобраться с редкостями Хара-Хото», – написал он Козлову из Петербурга в ноябре 1909 г. (Архив РГО. Ф. 18, оп. 3, д. 214, л. 23).

Весной 1910 г. ИРГО впервые выставило на обозрение хара-хотинскую коллекцию Козлова. Вскоре она была передана этнографическому отделу Музея императора Александра III (Русскому музею), за исключением книжного собрания, которое было передано в Азиатский музей Российской академии наук.

Выставка находок Монголо-Сычуаньской экспедиции П. К. Козлова в Императорском Русском географическом обществе.

Слева – витрины с коллекциями в Большом зале ИРГО.

Фото К. К. Буллы. 1910 г.

Архив РГО. Ф. 18. Оп.1. Д. 1225.

Внизу – витрина с рукописями из Хара-Хото. Фото К. К. Буллы.

1910 г. Архив РГО. Ф. 18. Оп. 1.

Д. 1231

9 марта 1910 г. император пожаловал начальнику Монголо-Сычуаньской экспедиции звание полковника с увеличением пожизненной пенсии в качестве награды за научное открытие, прославившее Россию. А вскоре Козлов был приглашен в Царское Село прочесть в присутствии царской семьи лекцию о своем путешествии с демонстрацией диапозитивов и некоторых хара-хотинских находок, за что получил от императора подарок. В том же году вице-председатель ИРГО преподнес Козлову диплом на звание почетного члена Общества. Вскоре после этого английское и итальянское королевские географические общества присудили русскому путешественнику большие золотые медали за его исследование Центральной Азии, т. е., по сути, за открытие Хара-Хото.

Получили награды и остальные участники экспедиции. Козлов также ходатайствовал и о награждении Цокто Бадмажапова: «Как старожил местного края Бадмажапов оказал экспедиции ценные услуги и способствовал лучшим отношениям к местным властям, с которыми у него установились простые дружеские отношения», – писал он в своем рапорте в Главный штаб. «Способный, энергичный Бадмажапов в будущем может быть незаменимым в качестве всестороннего посредника» (Архив РГО. Ф. 18, оп. 1, д. 57, л. 3). В результате Цокто получил орден св. Анны, однако остался недоволен и просил Козлова похлопотать о какой-либо другой, более полезной для него награде.





Здесь надо отметить, что на протяжении всей экспедиции Козлов поддерживал с Бадмажаповым-старшим тесные контакты. Так, путешественники дважды находили гостеприимный приют в его доме. Бадмажапов скупал для Козлова наиболее интересные буддийские культовые предметы у потомков монгольских князей и дворян, помогал с отправкой и получением почты из России, используя для этого различные возможности. Он же лично доставил Козлову и такую важную корреспонденцию, как письмо от А. В. Григорьева с указанием изменить маршрут экспедиции и не углубляться в Сычуань, а вернуться в пустыню Гоби и все внимание сосредоточить на исследовании мертвого города. Другое важное письмо было от Агвана Доржиева с сообщением о выступлении Далай-ламы со свитой из Пекина в Тибет: эта информация существенно повлияла на предстоящий маршрут экспедиции.

О дальнейшей судьбе Цокто Бадмажапова известно следующее. В 1910 г., опять-таки по протекции Козлова,

Выставка находок Монголо-Сычуаньской экспедиции П. К. Козлова в Императорском Русском географическом обществе.

Общий вид части экспозиции «Буддизм». Фото К. К. Буллы. Архив РГО. Ф. 18. Оп.1. Д. 1234. Справа – шкаф с мелкой скульптурой. Архив РГО. Ф. 18. Оп.1. Д. 1237

он получил место переводчика с монгольского языка при канцелярии Военного губернатора Восточной Сибири и переехал в Читу, столицу Забайкальского округа. В 1912 г., насколько можно судить по письмам, Бадмажапов возвращается к коммерческой деятельности, поступив на службу в торговый дом Нобеля, имевший отделения в Чите и Верхнеудинске. В том же году, по предложению губернатора, он был избран почетным членом Забайкальского областного попечительства детских приютов Ведомства учреждений императрицы Марии.





В начале 1920-х гг. Бадмажапов, как и многие другие представители бурятской интеллигенции, переселяется во Внешнюю Монголию, в г. Ургу. Здесь он трудится в правлении Монгольского центрального потребительского кооператива – первой национальной кооперативной организации Монгольской народной республики, ведавшей также вопросами внешней торговли. Осенью 1923 г. он вновь встречается с Козловым, который приводит в Ургу свою Монголо-Тибетскую экспедицию. Силою обстоятельств (вернее, интриг Наркоминдела и ОГПУ) Козлову пришлось надолго застрять в столице Красной Монголии. В доме Цокто он находит приют, и радушный хозяин, как и прежде, оказывает ему всевозможные услуги, например организует снабжение экспедиции продовольствием.

В начале 1930-х гг., когда в МНР начались репрессии против интеллигенции, Бадмажапов, огульно

Выставка находок Монголо-Сычуаньской экспедиции П. К. Козлова в Императорском Русском географическом обществе.

Витрина с этнографическими коллекциями. Фото К. К. Буллы. 1910 г.

Архив РГО. Ф. 18. Оп. 1. Д. 1228

обвиненный в контрреволюционной деятельности и панмонголизме, перебрался с семейством в Верхнеудинск (будущий Улан-Удэ), столицу советской Бурят-Монгольской автономной области. Здесь в 1931 г. он был арестован ОГПУ и выслан в Сыктывкар (Республика Коми). Рассказывают, что Козлов до самой своей смерти в 1935 г. оказывал ему посильную помощь.

По окончании пятилетней ссылки почти полностью ослепший Бадмажапов поселился в Новосибирске у падчерицы, откуда вскоре перебрался в Ленинград,

где примкнул к небольшой бурятской колонии. В 1937 г. последовал новый арест, завершившийся обычным для того страшного года смертным приговором.

В конце 1990-х гг. в Музее-квартире П. К. Козлова в Санкт-Петербурге была развернута фотоэкспозиция, посвященная открытию и раскопкам Хара-Хото. Среди редких фотографий на стенах музея можно увидеть и портрет Цокто Бадмажапова, имя которого неразрывно связано с именем знаменитого путешественника.

В 2017 г. музей посетил британский исследователь-географ Уильям Линдсей, более 30 лет занимающийся изучением Великой китайской стены. Линдсею довелось побывать в Хара-Хото несколько раз, а в 2016 г. он вместе с сыновьями Джеймсом и Томасом организовал видеосъемку мертвого города с помощью беспилотника во время солнечного восхода. Позднее он прислал мне это необыкновенное видео, продолжающееся полторы минуты, и я передал его в дар музею.

Глядя на Хара-Хото с высоты птичьего полета, невольно прикасаешься к истории Древнего мира и в то же время осознаешь величие подвига российских путешественников-первопроходцев, открывателей неведомых земель Центральной Азии.

Автор статьи выражает благодарность Уильяму Линдсею за разрешение публикации его видеосъемки и отдельных фотографий Хара-Хото на сайте и страницах журнала «НАУКА из первых рук»

Литература

Андреев А. И. О том, как был дважды открыт мертвый город Хара-Хото // От Байкала до священной Лхасы. Новые материалы о русских экспедициях в Центральную Азию в первой половине XX века (Бурятия, Монголия, Тибет). СПб., Самара, Прага, 1997. С. 61–86. Приложение: Бадмажапов Цокто. Развалины Хара Байшин. С. 87–91.

Козлов П. К. Монголия и Амдо и мертвый город Хара-Хото. Пг., 1923.

Козлов П. К. Дневники Монголо-Сычуаньской экспедиции 1907–1909 / ред.-сост. Т. И. Юсупова, отв. ред. А. И. Андреев. СПб.: Нестор-История, 2015.

Кычанов Е. И. Очерк истории тангутского государства. М.: Наука, 1968.

Юсупова Т. И. Монголо-Сычуаньская экспедиция и открытие Хара-Хото // Российские экспедиции в Центральную Азию в конце XIX – начале XX века / ред. И. Ф. Попова. СПб.: Славия, 2008. С. 112–129.

Юсупова Т. И. Путешествие как образ жизни: исследователь Центральной Азии П. К. Козлов. СПб.: Нестор-История, 2016.

Юсупова Т. И., Матвеева М. Ф. Выставка находок Монголо-Сычуаньской экспедиции П. К. Козлова в Русском географическом обществе. СПб.: ООО «Паулсен», 2019.

Автор и редакция благодарят Т. И. Юсупову, заведующую архивом РГО М. Ф. Матвееву и сотрудников Мемориального музея-квартиры П. К. Козлова за любезно предоставленные для статьи фотографии



Уильям Линдсей, автор фото мертвого города Хара-Хото. 2016 г.

ПОДПИСКА

На сайте журнала «НАУКА из первых рук» www.scfh.ru Вы можете:

● **Оформить подписку на печатную версию журнала**

3 номера печатной версии журнала, первое полугодие 2020 г. – 1050 руб.

В стоимость подписки включена доставка журнала заказной бандеролью.

Оригиналы бухгалтерских документов для юридических лиц (договор, счет-фактура и накладная) будут высланы Вам почтой

● **Купить отдельные выпуски печатной версии журнала «НАУКА из первых рук»**

Печатные выпуски журнала доставляются по почте

● **Способы оплаты**

Электронные платежи: через систему приема платежей Робокасса (банковскими картами, с помощью сервисов мобильной коммерции – МТС, Мегафон, Билайн, через интернет-банк ведущих банков РФ, через банкоматы и т. д.)

С помощью квитанции: после оформления заказа Вам будет выслана квитанция ПД-4 для оплаты заказа в ближайшем отделении Вашего Банка

● **Оформить подписку на электронную версию журнала (PDF)**

3 номера электронной версии журнала (PDF), первое полугодие 2020 г. – 350 руб.

6 номеров электронной версии журнала (PDF), 2020 г. – 700 руб.

Оплаченный номер электронной версии журнала (PDF) Вы получаете сразу после выхода очередного номера на указанный Вами адрес электронной почты

● **Купить отдельные выпуски электронной версии журнала «НАУКА из первых рук» (PDF)**

● **Получить электронный доступ**

к статье за 50 руб.,
ко всем статьям на сайте журнала:
на 1 мес. за 1000 руб.

При покупке электронного доступа Вы получаете возможность читать статьи сразу после успешной оплаты

По адресу <https://scfh.ru/en/> Вы можете получить бесплатный электронный доступ к англоязычной версии журнала SCIENCE First Hand

● **По всем вопросам обращаться:**

Тел.: 8 (383) 238-37-20
Факс: 8 (383) 238-37-20
e-mail: zakaz@info-press.ru

● **Платежные реквизиты:**

ООО «ИНФОЛИО»
ИНН 5408148073, КПП 540801001
Р/счет 407 02 810 523 120 001 110
в Филиале «Новосибирский»
АО «АЛЬФА-БАНК»,
г. Новосибирск
Кор/счет 30101810600000000774
БИК 045004774

Стоимость годовой подписки (6 номеров)
на 2020 г. – 2100 руб.

● **Подписаться на электронную версию и купить отдельные номера журнала Вы можете также:**

ЛитРес: www.litres.ru

Научная электронная библиотека:
www.e-library.ru

Пресса.ру: www.pressa.ru

В стоимость подписки включена доставка журналов заказной бандеролью



НАУКА
из первых рук

SCIENCE
First Hand

www.scfh.ru



ВСЕ
ВЫПУСКИ журнала

С 2004 по 2020 г.
<http://scfh.ru/archive/> — на русском языке
<http://scfh.ru/en/archive/> — на английском языке

*«Естественное желание
хороших людей —
добывать знание» Леонардо да Винчи*

**«НАУКА
ИЗ ПЕРВЫХ
РУК»**



«Хара-Хото ... с именем этого вечно сонного друга всегда-всегда будет связано и мое имя. Может быть, этому угасшему городу суждено будет всегда озарять мое имя географа», – с гордостью написал П.К. Козлов 4 ноября 1923 г. в дневнике своей последней Монголо-Тибетской экспедиции. И действительно, раскопки погребенного в гобийских песках древнего тангутского поселения, столицы государства Си Ся, принесли всемирную известность этому русскому путешественнику, ученику Н.М. Пржевальского.

Развалины Хара-Хото. 2015 г. Фото Уильяма Линдсея

