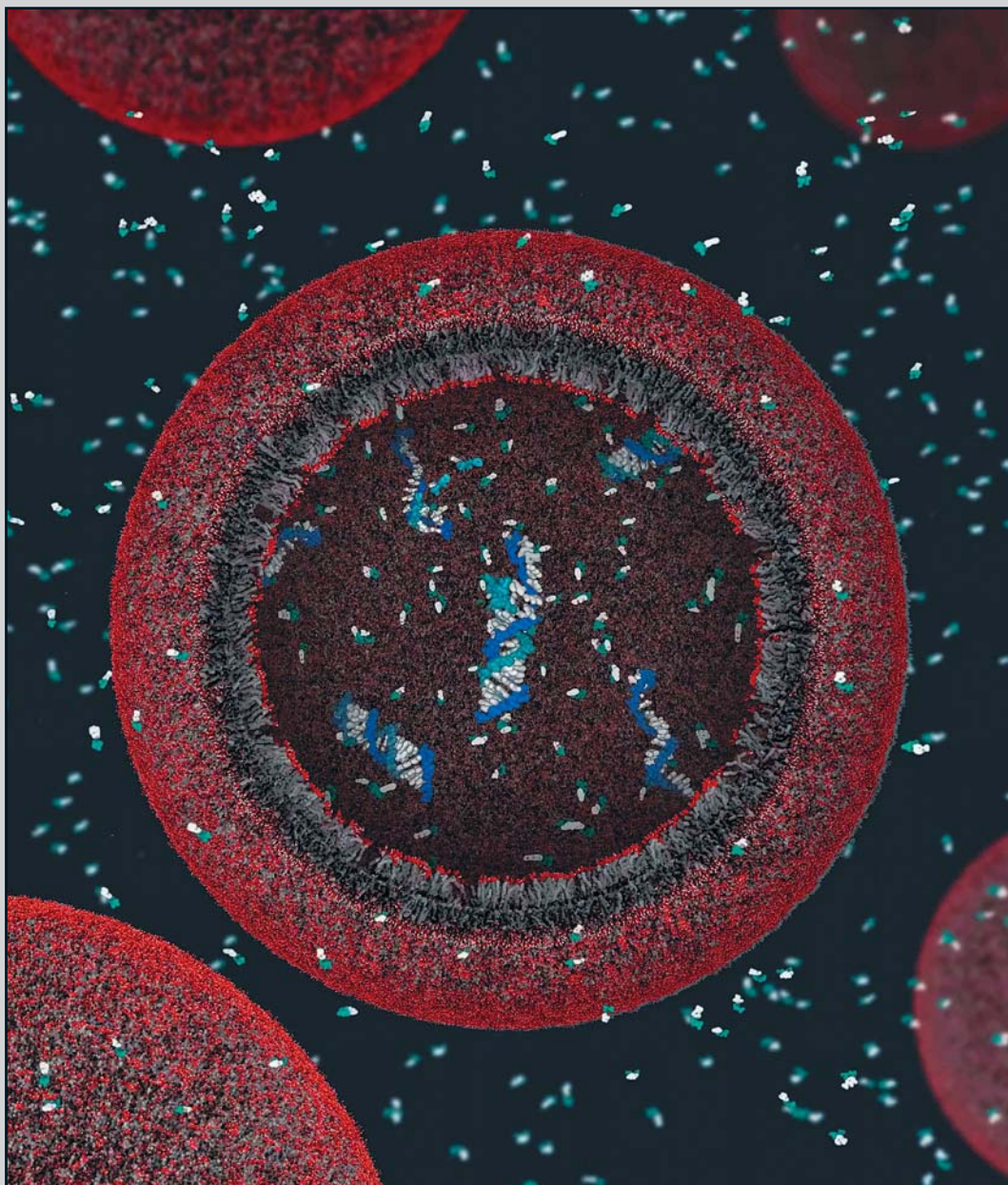


ПРИРОДА

1 15



В НОМЕРЕ:**3 Марков А.В.****В поисках начала эволюции**

В настоящее время ведется активный поиск стартовой точки биологической эволюции — первого репликатора, с появлением которого задача объяснения дальнейшего развития эволюционирующих систем принципиально упрощается. Как же без помощи естественного отбора мог появиться первый репликатор?

14 Александров П.А., Жук В.И., Литвинов В.Л.**Нанoeлектроника и радиация**

В нанoeлектронике размер активных компонентов и межсоединений оказывается близким к размерам области повреждения, которая создается одной попавшей в них частицей. Поэтому под действием облучения может произойти их внезапный отказ, и вся микросхема перестанет работать. Как выйти из этой, казалось бы, безнадежной ситуации?

22 Сергеев А.В., Благодатский А.С.**Насекомые и бионика: загадки зрительного аппарата**

Фасетки глаз у некоторых насекомых покрыты большим количеством плотно посаженных нанобугорков. Изучение их свойств привело к неожиданным результатам, которые могут быть использованы, например, для создания покрытий экрана смартфонов или поверхностей ячеек солнечных батарей.

28 Черных Е.Н.**Кочевой мир Евразии: номады Запада на заре эпохи металлов**

Продолжая рассказ об истории и культуре кочевых и полукочевых племен Евразии, остановимся на непростой судьбе номадов, живших в западной части нашего континента в эпоху раннего металла — с 5-го по 2-е тыс. до н.э.

42 Васильев С.В., Веселовская Е.В., Пестряков А.П.**Антропологическое исследование черепа последнего Инки**

Комплексный антропологический анализ хранящегося в Музее человека в Париже черепа Атауальпы — последнего правителя государства Тауантинсуйу (империи инков) — выявил особенности внешности легендарного императора и позволил доподлинно восстановить его портрет.

Резонанс**51 Никонов А.А.****Небывалое бедствие в селе Кашкаранцы****Научные сообщения****56 Маслов М.П.****Всплеск метеорного потока кометы 209P (LINEAR) в 2014 году****Заметки и наблюдения****59 Павлейчик В.М.****Урочище Жаманаркаш — объект природного наследия (59)****Щербаков В.В., Чернова Е.В.****Оживший камень (64)****68 Голиков Ю.П., Сысуев В.М.****Библиотека на Аптекарском острове К 125-летию Института экспериментальной медицины****75 ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2014 ГОДА****Туркин А.Н., Юнович А.Э.****По физике — И.Акасаки, Х.Аmano, С.Накамура (75)****Незлин Л.П.****По химии — Ш.Хелль, У.Мернер, Э.Бетциг (82)****Балабан П.М.****По физиологии или медицине — Дж.О'Киф, М.-Б.Мозер и Э.Мозер (89)****Рецензии****92 Вавилов Ю.Н., Трускинов Э.В., Раменская М.Е.****Российские исследователи Латинские Америки**

(на кн.: Великие русские экспедиции: Хроника путешествий XIX — первой половины XX в. Русские географы в Латинской Америке)

CONTENTS:**3 Markov A.V.****In Search of the Origin of Evolution**

An active search of the starting point of biological evolution — the first replicator, with emergence of which the task of explaining further development of evolving systems becomes drastically simpler — is under way. But how the first replicator could come to being without natural selection?

14 Aleksandrov P.A., Zhuk V.I., Litvinov V.I.
Nanoelectronics and Radiation

In nanoelectronics, the size of active components and interconnections between them is close to the dimensions of the damage regions that are caused by an impacting particle. Therefore, if they are irradiated, sudden failure may occur as a result of which the entire chip becomes inoperative. How to resolve this seemingly hopeless case?

22 Sergeev A.V., Blagodatski A.S.**Insects and Bionics:
Mysteries of the Visual Apparatus**

Facet eyes of some insects are covered with a large number of densely packed nanotubercles. Their analysis has given an unexpected results, that could be used, particularly, in smartphones displays coating production or for surface finishing of solar batteries.

28 Chernykh E.N.**Nomadic Realm of Eurasia:
Nomads of the West at the Dawn
of the Era of Metals**

Continuing the story of nomadic and semi-nomadic tribes' history and culture of Eurasia, let's have a look at complicated destiny of nomads inhabiting the Western part of our continent in the era of early metal, that is since 5 to 2 millennium BC.

**42 Vasil'ev S.V., Veselovskaya E.V.,
Pestryakov A.P.****Anthropological Study of the Skull
of the Last Inca**

Comprehensive anthropological analysis of the skull of Atahualpa, the last ruler of the Tawantinsuyu (Inca Empire), stored in the Museum of Man in Paris, revealed features of appearance of the legendary emperor and allowed to recover his true portrait.

Resonance**51 Nikonov A.A.****An Unprecedented Disaster
in the Village Kashkarantsy****Scientific Communications****56 Maslov M.P.****Splash of the Meteor Shower
of Comet 209P (LINEAR) in 2014****Notes and Observations****59 Pavlejchik V.M.****The tract Zhamanarkash —
an Object of Natural Heritage (59)****Shcherbakov V.V., Chernova E.V.****Animated Stone (64)****68 Golikov Y.P., Sysuev V.M.****Library on Aptekarskiy Island
To the 125th Anniversary
of Institute of Experimental Medicine****75 2014 NOBEL PRIZE WINNERS****Turkin A.N., Yunovich A.E.****In Physics — I.Akasaki, H.Amano,
S.Nakamura (75)****Nezlin L.P.****In Chemistry — S.Hell, W.Moerner,
E.Betzig (82)****Balaban P.M.****In Physiology or Medicine —
J.O'Keefe, M.-B. Moser
and E.Moser (89)****Book Reviews****92 Vavilov Yu.N., Truskinov E.V.,
Ramenskaya M.E.****Russian Researchers of Latin America
(on book: Great Russian Expeditions:
Chronicle of Voyages 19th — First Half
of 20th Centuries. Russian Geographers
in Latin America)**

В поисках начала эволюции

А.В.Марков

В настоящее время «творческие способности» дарвиновской эволюции хорошо известны биологам. Однако до сих пор ведется активный поиск ее стартовой точки, точнее, первого репликатора (от лат. *replicatio* — возобновление, повторение), с появлением которого задача объяснения дальнейшего развития эволюционирующих систем принципиально упрощается. Как же без помощи естественного отбора мог появиться первый репликатор?

Репликаторы — это объекты, которые не только способны «размножаться» (производить собственные копии тем или иным способом, например путем химического катализа), но и должны обладать наследственной изменчивостью. Иными словами, копирование некоего объекта должно быть не абсолютным, но все же достаточно точным, чтобы в череде поколений устойчиво воспроизводились его свойства (причем не только «общеродовые», но и индивидуальные) и при этом какие-то из наследственных различий влияли бы на эффективность размножения.

Еще в 1968 г. американский микробиолог К.Везе впервые предположил, что жизнь могла возникнуть на основе самореплицирующейся РНК, а спустя два десятилетия его знаменитый соотечественник У.Гилберт, получивший в 1980 г. Нобелевскую премию по химии за метод секвенирования ДНК, обосновал



Александр Владимирович Марков, доктор биологических наук, заведующий кафедрой биологической эволюции МГУ им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — теория биологической макроэволюции и математическое моделирование ее процессов. Известный популяризатор науки: автор многочисленных научно-популярных статей и книг, лауреат премии «Просветитель» (2011), создатель портала «Проблемы эволюции» и постоянный автор научно-просветительских сайтов «Элементы большой науки», «Антропогенез» и т.д.

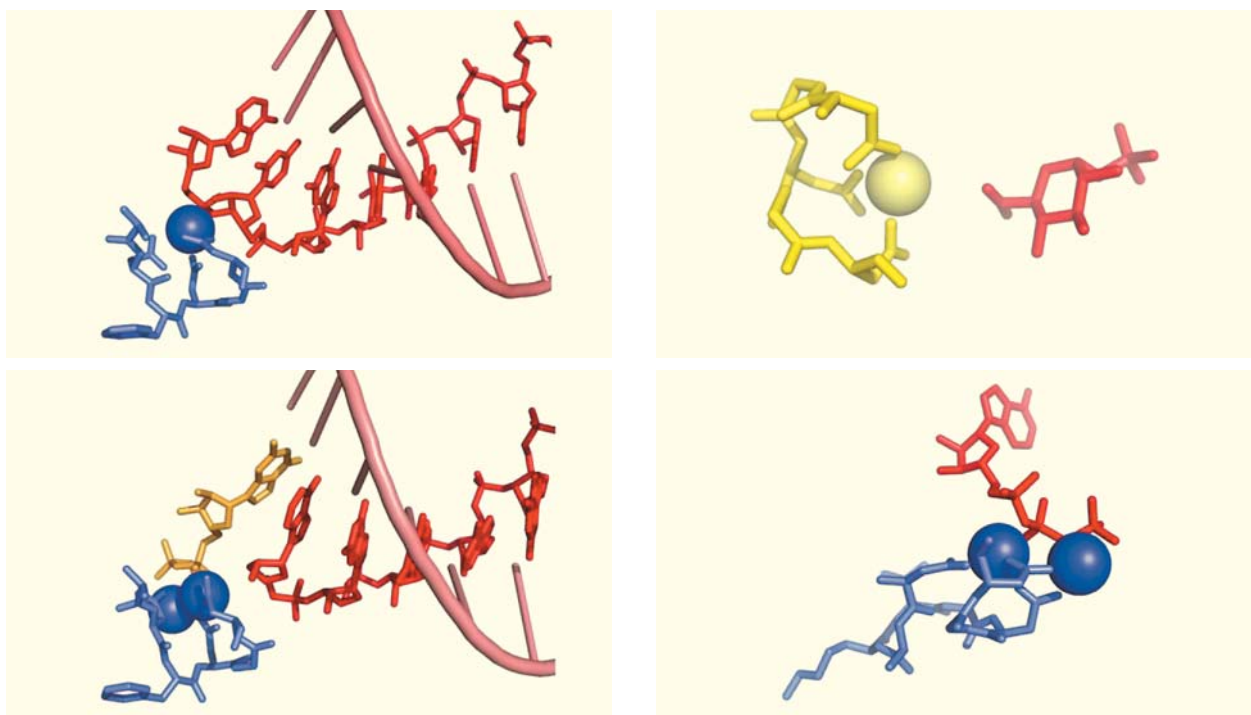
гипотезу «мира РНК». К настоящему времени эта гипотеза стала наиболее экспериментально обоснованной моделью происхождения жизни из неживой материи (абиогенеза).

Одиноким рибозим

Во многих версиях теории РНК-мира предполагается, что первым репликатором был рибозим с РНК-полимеразной активностью, способный катализировать матричный синтез (репликацию) других молекул РНК, в том числе — собственных копий, примерно так, как это делают современные белковые ферменты-полимеразы.

Репликация РНК на заре жизни могла катализироваться не напрямую рибозимами, а некими «посредниками», например короткими пептидами (синтез которых, в свою очередь, мог катализироваться рибозимами), или РНК-пептидными комплексами. Возможно, эту функцию выполняли простейшие пептиды, состоящие из аминокислот, которые встречаются в космосе и легко получают в экспериментах по абиогенному синтезу органики: глицина, аланина, валина, аспарагиновой кислоты, серина. О возможном строении таких «пребиотических» пептидов можно судить по устройству активных центров некоторых современных РНК-полимераз, где три отрицательно заряженных остатка аспарагиновой кислоты удерживают ион магния, играющий ключевую роль в катализе репликации РНК [1].

© Марков А.В., 2015



«Пребиотические» пептиды, которые предположительно могли катализировать репликацию РНК и другие реакции с участием фосфатных групп на заре жизни [1]. Структура пептидов реконструирована на основе строения активных центров современных РНК-полимераз. Слева сверху и внизу синим цветом выделен пептид DFDGD (Asp-Phe-Asp-Gly-Asp), удерживающий один или два иона Mg^{2+} (синие шарики) при помощи трех отрицательно заряженных остатков аспарагиновой кислоты, красным — молекула РНК, розовым — ДНК, желтым — ГТФ. Справа сверху желтым цветом отмечен пептид DGDGD (Asp-Gly-Asp-Gly-Asp) с ионом Zn^{2+} (желтый шарик), вступающий в связь с глюкозо-1-фосфатом (красный), внизу — синим показан пептид DAKVGDGD (Asp-Ala-Lys-Val-Gly-Asp-Gly-Asp) с двумя ионами Mg^{2+} , взаимодействующий с АТФ (красная).

Однако предположение о существовании молекул РНК, умеющих самовоспроизводиться без посредников, кажется более простым и потому заманчивым.

У современных организмов таких рибозимов нет. Это неудивительно: их давно должны были вытеснить более эффективные белковые полимеразы. Поэтому ученые пытаются получить их искусственно, сочетая методы «искусственной эволюции» и целенаправленного проектирования. В первом случае синтезируют много РНК со случайными последовательностями, отбирают из них обладающие нужным свойством хотя бы в минимальной степени, вносят случайные мутации, снова отбирают и т.д. При целенаправленном проектировании секвенируют получившийся на каком-то этапе «искусственной эволюции» рибозим, анализируют его структуру. Затем необходимо решить, как его можно усовершенствовать (что лишнее отрезать, что добавить), исходя из знаний о связи свойств молекулы РНК с ее структурой.

В необъятном пространстве последовательностей всех возможных молекул РНК уже найдены рибозимы, способные катализировать матричный синтез РНК — правда, с низкой эффективностью. В роли матрицы в экспериментах вы-

ступает одиночная нить РНК, на которой из активированных нуклеотидов последовательно синтезируется комплементарная нить. Лучшие из полученных рибозимов-полимераз способны реплицировать матрицы длиной до 206 нуклеотидов, что превышает длину самого рибозима [2]. Удалось продемонстрировать синтез функционального рибозима (с иной каталитической активностью и меньшего размера) с помощью рибозима-полимеразы [3].

Судя по результатам подобных опытов, рибозим-полимераза должен быть довольно большим (100—200 нуклеотидов). Спонтанное возникновение такой молекулы без дарвиновского механизма маловероятно. Е.В.Кунин в своей выдающейся книге «Логика случая» попытался рассчитать, мог ли случайно собраться такой рибозим хотя бы на одной планете (если предположить, что на всех планетах земного типа шел спонтанный синтез РНК со случайными последовательностями), и ему лишь с большими натяжками хватило для этого размеров наблюдаемой Вселенной [4].

Рибозим-полимераза, без посторонней помощи реплицирующий свои копии, должен быть еще и довольно точным, чтобы избежать необратимой мутационной деградации: он должен де-

лать не более одной-двух ошибок за акт репликации. Если его длина 100–200 нуклеотидов, это соответствует частоте мутаций около 0.01.

Те рибозимы-полимеразы, которые уже удалось получить, близки к этому минимально допустимому уровню точности. Однако они не могут реплицировать сами себя. Их главный недостаток — сильная зависимость эффективности репликации от последовательности нуклеотидов в матрице. В отличие от белковых полимераз, рибозимам-полимеразам не все равно, какие нуклеотиды и в каком порядке стоят в копируемой матрице. Поэтому далеко не всякая матрица может быть реплицирована данным рибозимом.

Рибозимы-полимеразы наверняка будут в дальнейшем усовершенствованы. Например, недавно выяснилось, что их искусственную эволюцию удобно вести во льду; это позволило сильно улучшить прежние показатели [2]. Еще одно недавнее достижение — получение короткого (всего 83 нуклеотида!) рибозима — кросс-хиральной РНК-полимеразы [5]. Этот рибозим, состоящий из «правых» нуклеотидов (из них состоят все молекулы РНК в клетках; правые нуклеотиды со-

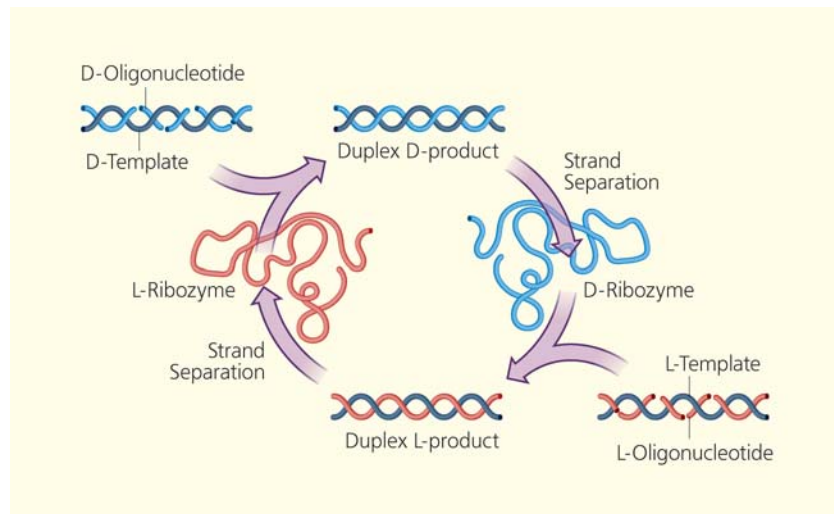
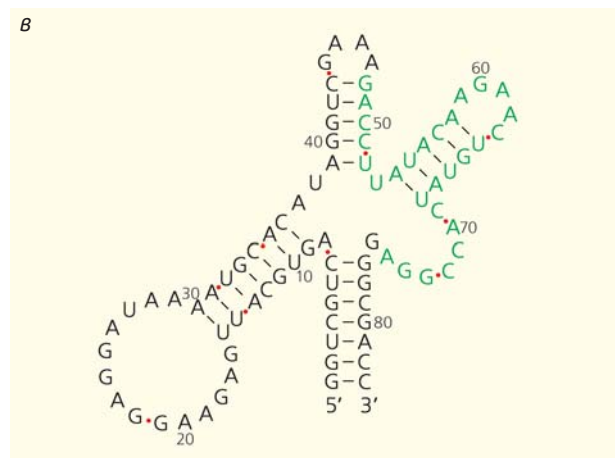
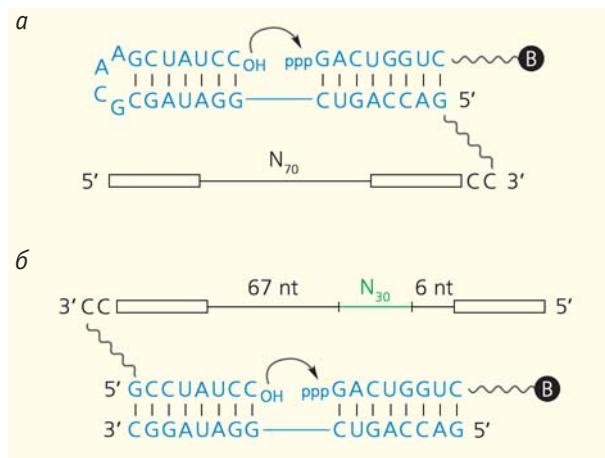


Схема взаимной репликации левых (L) и правых (D) рибозимов, которая могла происходить на заре жизни (doi:10.1038/nature13935). Левый рибозим (L-Ribozyme) сшивает (лигирует) правые олигонуклеотиды (D-oligonucleotide), присоединившиеся к комплементарной правой матрице (D-Template). В результате образуется двойная спираль из двух комплементарных нитей правой РНК (Duplex D-product). Затем она расплетается на две нити (Strand Separation), одна из которых (D-Ribozyme) катализирует соединение левых олигонуклеотидов (L-Oligonucleotide) на левой матрице (L-Template). После разделения нитей получившегося L-дуплекса образуется левый рибозим.

держат правый энантиомер рибозы), способен катализировать репликацию собственной зеркальной копии — такого же рибозима, только сделанного из левых нуклеотидов. Левый рибозим, в свою очередь, может катализировать репликацию исходного правого рибозима. Замечательно,



Молекулярные конструкции, использовавшиеся в первых 10 поколениях отбора (а), последующих шести поколениях (б) и полученный в итоге рибозим — кросс-хиральная РНК-полимераза (в) [5]. Эволюционирующая молекула D-РНК (черная линия внизу рисунка а) состоит из двух фиксированных участков по краям и случайной последовательности из 70 нуклеотидов в середине (N70). Волнистой линией обозначен химический «мостик», изогнутой стрелкой — место лигирования, где D-РНК сшивает олигонуклеотид с праймером (ppp — три остатка фосфорной кислоты на 5'-конце олигонуклеотида). Синим цветом выделены молекулы L-РНК: матрица с праймером и олигонуклеотид GACUGGUC с молекулой биотина («В» в черном круге); зеленым — дополнительная вставка из 30 случайных нуклеотидов (N30).

что кросс-хиральные РНК-полимеразы оказались более универсальными, чем их «коллеги», работающие с субстратами той же хиральности: их эффективность почти не зависит от последовательности нуклеотидов в матрице. Причина в том, что молекулы РНК разной хиральности не образуют друг с другом уотсон-криковских связей, основанных на принципе комплементарности. Поэтому кросс-хиральным полимеразам приходится узнавать свой субстрат и взаимодействовать с ним благодаря своей третичной, а не первичной структуре, что и приводит к ослаблению зависимости их эффективности от последовательности нуклеотидов в матрице.

Безусловно, главная трудность, связанная с идеей о рибозиме-полимеразе в роли первого репликатора, состоит в том, что его спонтанное появление слишком маловероятно. Гипотеза о том, что большая функциональная молекула получилась «просто так», без эволюции, без отбора, без использования матричного синтеза и комплементарности, в результате случайного комбинирования нуклеотидов, выглядит слишком неэкономной, «притянутой за уши». Можно, конечно, следуя за Куниным, привлечь слабый антропный принцип и теорию множественных вселенных. Если наша Вселенная — лишь одна из бесчисленного множества существующих, то «число попыток» абиогенеза было столь большим, что мы вправе допустить — в зарождении жизни на нашей планете повинна цепочка крайне маловероятных, почти чудесных совпадений. Но все-таки хотелось бы обойтись без этого крайнего средства (например, чтобы не потерять надежду когда-нибудь встретить внеземную жизнь: если вероятность абиогенеза близка к нулю, нет никаких шансов найти в обозримом космосе еще одну живую планету).

Вопрос сводится к тому, можно ли прийти к рибозиму-полимеразе путем закономерного эволюционного развития (а не случайного комбинирования нуклеотидов). Могла ли эволюция стартовать до появления рибозима-полимеразы? В этом случае молекулы РНК с полимеразной активностью могли бы оказаться результатом, а не предпосылкой эволюции, что повышает вероятность абиогенеза в астрономическое число раз.

Репликатеры из рибозимов-лигаз

Тридцатилетний опыт изучения рибозимов ясно показал, что лигирование (сшивание коротких РНК в более длинные) дается рибозимам куда лучше, чем репликация путем последовательного присоединения отдельных нуклеотидов. В опытах по искусственной эволюции рибозимы-лигазы получают легко и в большом разнообразии из случайных (причем довольно коротких) последовательностей нуклеотидов.

На этом основании разрабатываются модели, в которых путь к эффективному рибозиму-полимеразе идет через два следующих промежуточных этапа [6].

Случайная полимеризация коротких РНК на минеральных матрицах. Особенно хорошо показал себя в этом отношении глинистый минерал монтмориллонит, на котором из нуклеотидов, активированных имидазолом или 1-метиладенином, удается синтезировать одноцепочечные РНК длиной до 50 нуклеотидов (если это полимеры одного нуклеотида) или до 20 нуклеотидов (из всех четырех нуклеотидов попеременно) [7].

Формирование длинных РНК путем лигирования коротких. Этот процесс катализируют спонтанно возникающие (в ходе полимеризации на минералах) простые рибозимы-лигазы. Синтез длинных РНК и перекомбинирование их фрагментов (рекомбинация) в конце концов приводит к появлению рибозима-полимеразы.

Важным промежуточным этапом на этом пути могли стать примитивные репликаторы, представляющие собой содружества лигаз, собирающих копии друг друга из фрагментов (олигонуклеотидов).

Уже известны саморазмножающиеся рибозимы-лигазы, собирающие копии самих себя из двух половинок [8] и более интересные комплексы молекул РНК, размножающие друг друга путем лигирования. Так, в 2009 г. американские ученые Т. Линкольн и Дж. Джойс из Научно-исследовательского института им. Эллен Скриппс подобрали несколько пар рибозимов, способных собирать копии друг друга из олигонуклеотидов [9]. В результате такого взаимного размножения популяция рибозимов может расти в геометрической прогрессии сколь угодно долго — для этого нужно только исправно снабжать ее «пищей», т.е. материалами для синтеза новых молекул РНК. За 30 ч популяция может в благоприятных условиях вырасти в 100 млн раз. Более того, заставив несколько разных пар размножающихся рибозимов конкурировать друг с другом за субстрат, исследователи вынудили их начать дарвиновскую эволюцию. В результате вывелись рекомбинантные рибозимы с повышенной скоростью размножения.

Единственное, что не позволяет назвать этот результат окончательным решением проблемы самовоспроизведения РНК, — это природа субстрата. Размножающиеся пары рибозимов-лигаз в описанных экспериментах используют для сборки молекул РНК не отдельные нуклеотиды, а довольно длинные фрагменты РНК — олигонуклеотиды. Причем не любые, а только строго определенные (поскольку взаимодействие между рибозимом и субстратом осуществляется путем формирования уотсон-криковских связей).

В дальнейшем было показано, что рибозимы-лигазы, способные к взаимной сборке, склонны

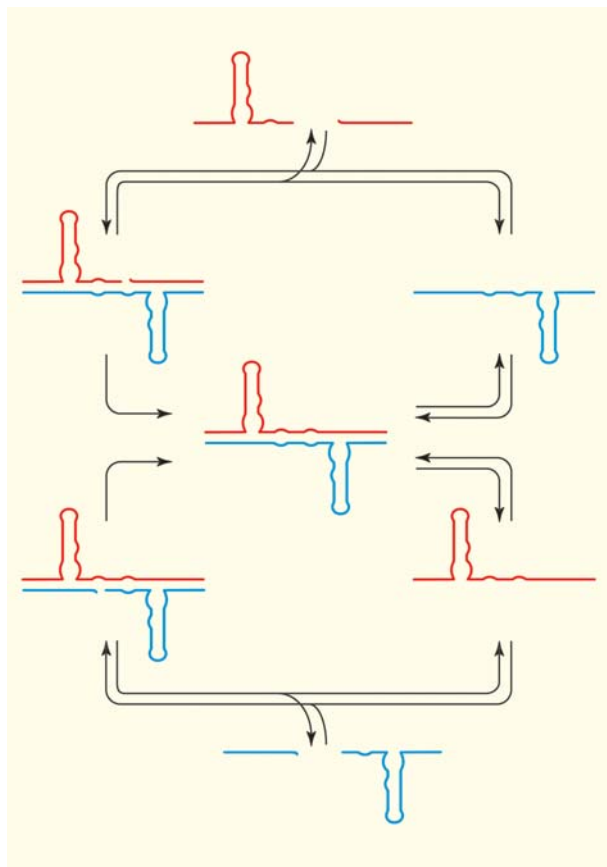


Схема репликации рибозимов за счет лигирования [9]. Исходными субстратами служат четыре олигонуклеотида (два красных в верхней части рисунка и два синих — в нижней). Синий рибозим служит матрицей для сборки красного рибозима из двух красных олигонуклеотидов, а красный рибозим — матрицей для сборки синего рибозима из двух синих олигонуклеотидов.

формировать более сложные содружества — каталитические циклы, в которых одни молекулы собирают из кусочков другие [10]. Удивительно, что такие сообщества рибозимов, основанные на взаимопомощи, размножаются быстрее «эгоистов» — молекул РНК, собирающих только копии самих себя.

Эти факты позволяют предположить, что на ранних этапах абиогенеза могли существовать примитивные репликаторы, представлявшие собой содружества рибозимов-лигаз и малоэффективных, неточных рибозимов-полимераз. Полимеразы множили короткие олигонуклеотиды, а лигазы сшивали из них более крупные молекулы РНК — копии полимераз и самих себя. Любопытно, что некоторые рибозимы-лигазы одновременно обладают и слабой полимеразной активностью, т.е. могут использовать в качестве субстрата не только олиго-, но и мононуклеотиды (именно так обстоит дело с упомянутыми выше кросс-хиральными РНК-полимеразами).

Таким образом, момент появления первого полноценного репликатора (или, что то же самое, момент начала дарвиновской эволюции) мог наступить еще до формирования полноценных рибозимов-полимераз. Тем самым вероятность самозарождения первого репликатора повышается. Участие лигаз, которые действительно спонтанно образуются в результате синтеза коротких случайных олигонуклеотидов (например, в ходе полимеризации на монтмориллонитовой матрице), облегчает путь к РНК-полимеразам и позволяет отодвинуть старт эволюции на более ранние этапы абиогенеза.

Но все же переход от первых лигаз к примитивному репликатору описанного выше типа вырисовывается пока довольно смутно, а главное, этот переход, по-видимому, должен был произойти без помощи дарвиновского эволюционного механизма. Отсюда следующий закономерный вопрос: не могла ли эволюция стартовать еще раньше?

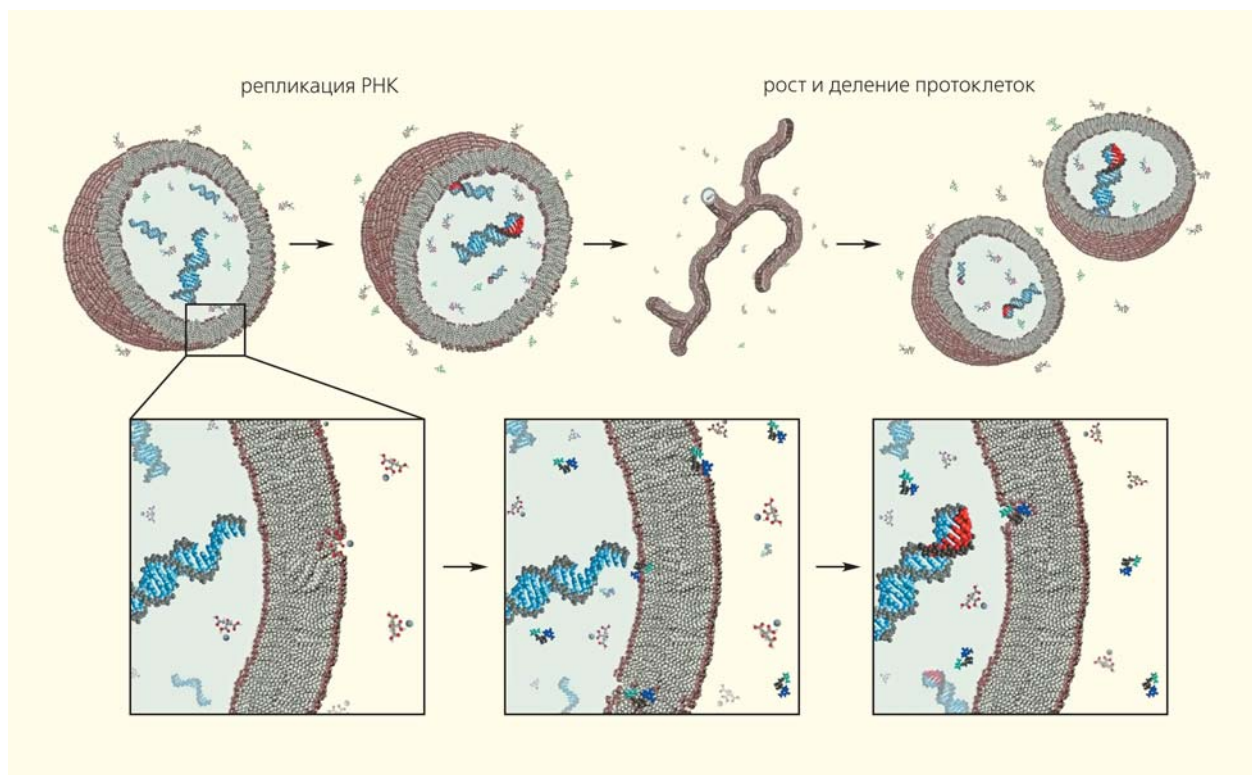
Репликация без ферментов

Процесс, позволяющий (по крайней мере теоретически) отодвинуть начало эволюции максимально далеко в прошлое, известен. Это неферментативный матричный синтез, или неферментативная репликация РНК (либо какого-то другого полимера, который был предшественником РНК, — такая возможность тоже рассматривается специалистами, но в данной статье об этом речи нет). В присутствии ионов магния на однонитчатой молекуле РНК могут спонтанно, без помощи белковых ферментов или рибозимов, полимеризоваться короткие комплементарные последовательности нуклеотидов. В результате образуются дуплексы.

Неферментативную репликацию (НР) РНК в 1980-х годах активно изучал известный британский химик Л.Оргел. Он добился немалых успехов; в частности, ему удалось реплицировать матрицу из 14 нуклеотидов, содержащих гуанин (G) и цитозин (C) [11]. К концу жизни Оргел разочаровался в идее из-за многочисленных неразрешенных трудностей [12]. Однако в наши дни его дело продолжил американский биолог, лауреат Нобелевской премии 2008 г. Дж.Шостак. Особенность его подхода — уверенность в том, что жизнь зародилась внутри «протоклеток», окруженных липидными мембранами, а не в микрополостях минералов, как считают другие авторы [13].

Современную ситуацию в области изучения неферментативной репликации РНК описал Шостак в обзорной статье, где выделил восемь препятствий, стоящих на пути эффективной НР, и наметил пути их преодоления [14].

Препятствие 1. Несовершенная региоспецифичность. В ходе неферментативной репликации



Общая схема синтеза РНК в «протоклетках» (окруженных липидными мембранами пузырьках) [13]. Протоклетка растет за счет того, что в ее оболочку встраиваются молекулы жирных кислот, плавающие в окружающей среде в виде мицелл. Получающиеся нитевидные, ветвистые структуры распадаются на отдельные пузырьки при легком встряхивании. В протоклетки заранее помещены молекулы РНК с затравками-праймерами (двухспиральная часть молекулы) и однонитевым «хвостом», который нужно реплицировать. Активированные нуклеотиды из окружающей среды проникают в протоклетку путем диффузии. В присутствии комплекса из цитрата и ионов Mg^{2+} они участвуют в неферментативной репликации РНК. В результате достраивается фрагмент двойной спирали, выделенный красным цветом.

наряду с «правильными» связями между нуклеотидами ($3'-5'$) образуются также «неправильные» ($2'-5'$). Впрочем, можно повысить долю правильных связей, если использовать в качестве катализатора ионы цинка, а не магния. Тот же эффект достигается, если активировать нуклеотиды не имидазолом, а 2-метил-имидазолом. Кроме того, такая ненаследуемая вариабельность связей, по-видимому, не препятствует эволюции функциональных рибозимов. В 2013 г. Шостак и его коллеги экспериментально показали, что рибозимы устойчивы к случайной ненаследуемой гетерогенности связей $2'-5'$ и $3'-5'$ [15].

Препятствие 2. Высокая температура плавления РНК-дуплексов. Если в результате неферментативной репликации получается длинная двойная спираль, ее потом трудно (при условиях, совместимых с НР) разделить на две цепочки, чтобы цикл мог продолжиться. Поэтому предполагается, что условия в «колыбели жизни» чередовались [16]: временами там становилось очень горячо (например, из-за геотермальных выбросов), и двойные спирали расплетались; потом водоем остывал (локальный горячий выброс смешивался

с окружающей водой), и неферментативная репликация могла продолжаться. Кроме того, на помощь приходит вышеупомянутая несовершенная региоспецифичность: даже небольшая примесь «неправильных» связей ($2'-5'$) сильно снижает температуру плавления РНК-дуплексов.

Шостак выдвинул еще одну красивую идею: несовершенная региоспецифичность могла на первых порах быть полезной еще и потому, что помогала рибозимам совмещать функцию катализа с функцией матрицы для НР. На каждой матрице синтезировались разные варианты реплик. Те из них, в которых было много неправильных связей, хуже сворачивались в трехмерные структуры, легче расплетались и потому лучше выполняли функцию матриц (но не рибозимов). В других репликах было мало неправильных связей, они сворачивались в прочные трехмерные структуры и хорошо работали рибозимами, хотя и с трудом реплицировались. Гомогенные продукты (только с «правильными» связями) не справились бы с обеими задачами сразу. Итак, возможно, что несовершенная региоспецифичность — никакая не проблема, а наоборот, цен-

нейшее свойство, которое позволило РНК стать «молекулой жизни».

Препятствие 3. Низкая точность копирования. Чтобы эффективно копировать хоть какие-то функциональные рибозимы до появления РНК-полимераз, неферментативная репликация должна иметь частоту ошибок не более 0.02. В действительности эта частота, как правило, выше (порядка 0.17). Ее можно снизить до 0.10 и даже 0.05, если брать матрицы с повышенным содержанием нуклеотидов G и C. Замечу, что большинство ошибок НР совершается при попытке присоединить нуклеотид уридин (U), поэтому чем меньше в матрице нуклеотидов аденозин (A), тем лучше. Не исключено, что повысить точность НР может замена U на 2-тио-U или даже 2-селено-U. Оба этих модифицированных нуклеотида иногда встречаются в антикодонах тРНК современных организмов, что повышает точность трансляции, поскольку эти нуклеотиды реже образуют «неправильную» пару с G, чем обычный U. Кто знает, может быть, это древний рудимент из эпохи пре-РНК-мира.

Еще один возможный путь преодоления данного препятствия основан на том, что после присоединения неправильного нуклеотида НР замедляется. Поэтому те акты репликации, которые проходят без ошибок, заканчиваются быстрее. Если нити быстро расплетаются и снова подвергаются НР, реальная точность НР может оказаться в 2–5 раз выше, чем думают экспериментаторы, когда измеряют эту точность единожды в конце опыта, после того как все матрицы один раз отреплицировались. Благодаря этому эффекту есть шанс не сорваться в пропасть мутационной дегенерации, даже имея базовую частоту ошибок 0.05–0.08 вместо требуемых 0.02.

Препятствие 4. Низкая скорость копирования. Неферментативная репликация идет примерно в том же временном масштабе, что и самопроизвольная дегенерация копируемой матрицы. Исследователи ищут условия, ускоряющие НР. Известно, что этот процесс идет быстрее во льду при -20°C , но это не устраивает Шостака, поскольку в таких условиях разрушаются мембранные пузырьки — протоклетки, с которыми он работает. Есть и другие обнадеживающие идеи; в частности, возможна неферментативная репликация путем присоединения очень коротких комплементарных олигонуклеотидов с последующим заполнением просветов и спонтанным лигированием кусочков в единую комплементарную нить [17].

Препятствие 5. Проблема реактивации. Активированные нуклеотиды гидролизуются, что снижает эффективность НР, а существующие способы реактивации нуклеотидов портят реплицируемую матрицу. По-видимому, простейший способ справиться с этой проблемой — перейти от замкнутой системы к проточной. РНК-матрицы или мембранные пузырьки, их содержащие, нужно закрепить (например, на поверхности минера-

лов) и поместить в проточную систему с постоянным притоком свежих активированных нуклеотидов (правдоподобный механизм абиогенного синтеза активированных пиримидиновых нуклеотидов C и U был найден недавно британскими химиками [18]).

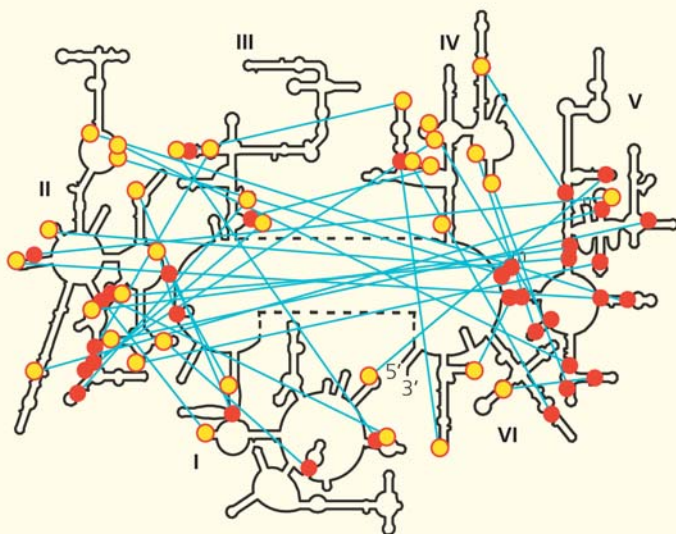
Препятствие 6. Двухвалентные ионы металлов, высокая концентрация которых необходима для НР, катализируют не только НР, но и дегенерацию одноцепочечных РНК. Кроме того, они разрушают мембраны протоклеток и повышают температуру плавления РНК-дуплексов.

Красивое решение этой проблемы было найдено Шостаком и его ученицей К.Адамалой в 2013 г. Они задумались о подборе хелатора, т.е. такой молекулы, которая, соединяясь с ионом магния, обхватывала бы его, как клешня, и лишала некоторых каталитических свойств, сохранив нужные. Адамала и Шостак испытали множество хелаторов и обнаружили, что некоторые из них (в том числе цитрат, изоцитрат, оксалат) защищают мембраны протоклеток от разрушения ионами магния. Но в большинстве случаев ионы магния при этом лишаются также и способности катализировать НР. Исключением оказался цитрат: в его присутствии репликация лишь немного замедлилась. Более того, цитрат полностью лишил ионы магния способности разрушать одонитевые молекулы РНК.

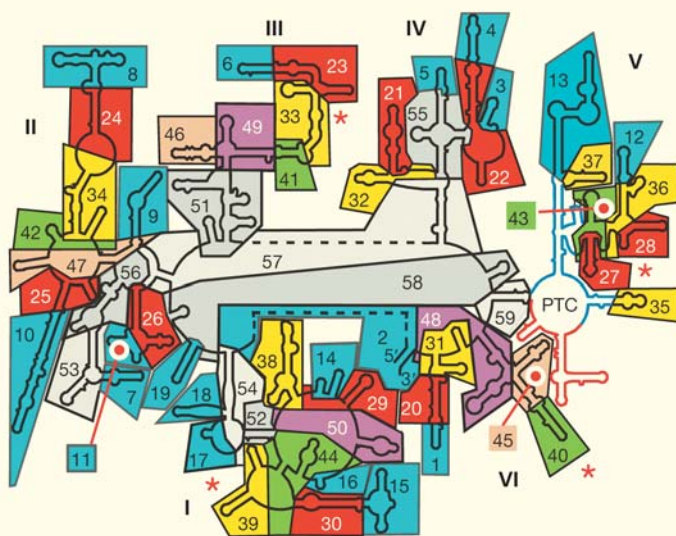
Установив эти факты, Адамала и Шостак экспериментально продемонстрировали возможность НР внутри протоклеток. Они изготовили мембранные пузырьки — протоклетки с молекулами РНК внутри. К каждой одонитевой матрице заранее прикреплялся праймер — фрагмент комплементарной последовательности, образующий с матрицей двойную спираль. При этом у матрицы оставался одонитевой хвостик, состоявший либо из нескольких нуклеотидов C (НР таких последовательностей идет быстрее всего), либо из чередующихся G и C. Затем в среду, где плавали протоклетки, добавили хлорид магния, цитрат и нуклеотиды, активированные имидазолом.

Опыт удался: через два-три дня большинство одонитевых участков оказались полностью реплицированы, т.е. молекулы стали целиком двуспиральными. В ходе работы подтвердилось предположение, что репликацию можно ускорить, если сделать систему проточной и своевременно удалять отходы (в том числе нуклеотиды, подвергшиеся незапланированному гидролизу). Еще один приятный сюрприз ждал исследователей, когда они проверили, не повлиял ли цитрат на температуру плавления двуспиральных РНК (которая, как говорилось, повышается в присутствии ионов магния). Оказалось, что температура плавления снизилась с 75 до 71°C .

Таким образом, простая мера — добавление хелатора — позволила преодолеть сразу несколько препятствий на пути к эффективной НР в протоклетках [13].



Вторичная структура молекулы 23S-rРНК [20]. Голубыми линиями показаны А-минорные связи, желтыми кружками — «стопки» аденозинов, красными — двойные спирали, участвующие в А-минорных связях. Домены с первого по шестой обозначены римскими цифрами. 5', 3' — концы молекулы. Видно, что в домене V много красных кружков и почти нет желтых. Скорее всего, именно с этого фрагмента молекулы, катализирующего реакцию транспептидации (соединения аминокислот), началась эволюция 23S-rРНК.



Молекула 23S-rРНК как трехмерная головоломка: схема сборки/разборки [20]. Можно удалить, не повреждая структуру остающихся частей, сначала синие блоки, затем красные, желтые, зеленые, розовые, сиреневые и, наконец, белые и серые. В итоге остается «неразобраным» центр транспептидации (РТС), состоящий из двух симметричных частей, показанных синими и красными линиями.

Присутствовал ли абиогенно синтезированный цитрат в древних водоемах, служивших колыбелью зарождающейся жизни? До недавнего времени правдоподобные способы абиогенного синтеза цитрата не были известны. Ситуация изменилась в 2013 г., когда группа американских ученых нашла реалистичный путь абиогенного синтеза щавелевоуксусной кислоты (оксалоацетата) [19]. От этого вещества до цитрата уже рукой подать.

Но Шостак и Адамала предлагают идею более интересную и глубокую, чем гипотеза о наличии абиогенного цитрата в «колыбели жизни». Роль хелатора, подавляющего негативные эффекты ионов Mg^{2+} и помогающего им катализировать НР, могли взять на себя короткие пептиды, включающие несколько остатков аспарагиновой кислоты (об этой возможности упомянуто в начале статьи). Наличие абиогенных аминокислот и простейших пептидов в «колыбели жизни» считается высоковероятным. С появления простых рибозимов, катализирующих соединение аминокислот друг с другом, скорее всего, началась эволюция белкового синтеза [20]. Шостак и его коллеги в настоящее время пытаются найти простые пептиды, способные помочь магнию катализировать НР лучше, чем это делает цитрат. По-видимому, это очень перспективный путь. «Содружество» пептидов с РНК, скорее всего, зародилось задолго до появления матричного белкового синтеза (трансляции).

Препятствие 7. Проблема праймеров. В экспериментах по изучению НР используются матрицы с заранее приделанными праймерами — комплементарными олигонуклеотидами, которые в ходе НР удлиняются на 3'-конце. Но откуда брались праймеры в «колыбели жизни»? Особенно остро эта проблема стоит для протоклеток, потому что пузырьки, окруженный липидной мембраной, не может

всасывать готовые праймеры извне — олигонуклеотиды не проходят через мембраны.

По мнению Шостака, должен существовать способ беспраймерной НР: моно- или олигонуклеотиды комплементарно пристраиваются прямо посередине матрицы, потом к ним присоединяются другие, кусочки лигируются, просветы заполняются. Эти возможности пока мало изучены.

Проблема праймеров в «мире НР» (в преРНК-мире) могла привести к тому, что селективное преимущество получали (т.е. быстрее размножались) те молекулы РНК, которым легче было найти себе праймер. Например, либо те, которые сами могли служить себе праймерами для самоудлинения («шпилька с хвостиком»), либо те, для которых в окружающей среде (протоцитке или минеральной микрополости) было много подходящих праймеров. Удобнейшим вариантом была бы способность молекулы РНК служить праймером для репликации собственных копий или реплик.

Препятствие 8. Обратное слипание комплементарных цепочек. Этот процесс идет гораздо быстрее, чем НР, и сильно затрудняет ее: получается двухцепочечная РНК, которая не может реплицироваться путем НР, пока цепочки не разъединятся. Простейший путь решения проблемы — уменьшить концентрацию РНК (матриц) в системе, ведь скорость «обратного слипания» пропорциональна квадрату их концентрации. Фактически проблема сводится к ограничению концентрации размножаемых молекул: если концентрация превышена, НР тормозится.

Даже в ходе полимеразной цепной реакции, где все делают белковые ферменты (с колоссальной скоростью), проблема обратного слипания не позволяет достигать слишком высоких концентраций размножаемой последовательности. А НР идет страшно медленно (присоединение одного нуклеотида в час — это хорошая скорость для НР), поэтому допустимые концентрации должны быть крайне низкими.

Противостоять обратному склеиванию может быстрое присоединение к разделившимся цепочкам коротких комплементарных олигонуклеотидов. Заодно это будет стимулировать дальнейшую НР, ведь такие прилипшие тут и там олигонуклеотиды — это промежуточные стадии НР, которые могут нарастать на 3'-концах, лигироваться и т.д. Для этого надо, чтобы коротких комплементарных олигонуклеотидов было достаточно много.

Шостак представляет себе «колыбель жизни» как геотермальный район с многочисленными прудами и озерами, сообщающимися, проточными и стоячими; в водоемы периодически поступали горячие выбросы, но большую часть времени там было относительно прохладно. В таких системах абиогенно синтезируемая органика могла достигать высоких концентраций. Первыми функциональными рибозимами, по мнению Шостака, были те, которые служили для «обмена ве-

ществ»: катализаторы синтеза фосфолипидов (что способствовало росту и делению протоклеток); реактивирующие рибозимы; нуклеазы, которые обрезали перекрывающиеся концы у олигонуклеотидов (это ускоряло НР) и т.д. Репликация РНК сначала была неферментативной. В конце концов лигазы и полимеразы стали ускорять репликацию, но нет оснований полагать, что лигазная и полимеразная функции появились первыми.

Так или иначе, нам больше не нужно предполагать, что полимеры, случайно образовавшиеся в большом количестве на древней Земле, лишь по чистой случайности обладали свойством комплементарности, т.е. были потенциально способны направлять процесс самокопирования. Разумеется, комплементарность должна была работать с самого начала. И с самого начала работал естественный отбор.

Палиндромный мир

На мой взгляд, главный вывод из сказанного состоит в следующем. Допустим, что где-то на ранней Земле или другом теле ранней Солнечной системы некогда существовали благоприятные условия для спонтанной полимеризации олигонуклеотидов на минеральных матрицах и для неферментативной репликации РНК. Тогда в этом мире дарвиновский (или квазидарвиновский) эволюционный процесс мог начаться не только до появления эффективных рибозимов-полимераз, но и до появления каких бы то ни было рибозимов.

«Проблема праймеров» могла привести к естественному отбору последовательностей, которые служили праймерами для самих себя, для своих копий или комплементарных реплик. В таком случае селективное преимущество могли получить последовательности, состоящие из коротких палиндромов (палиндром — это последовательность, левая и правая части которой комплементарны друг другу; палиндромные участки РНК имеют обыкновенные сворачиваться в «шпильки»). Например, последовательность 5'-GGACCU.AGGUCC-3' — это короткий палиндром. Точка посередине нарисована для удобства восприятия: она делит последовательность на два взаимно комплементарных блока. Реплика этой последовательности выглядит так: 3'-CCUGGA.UCCAGG-5' (это, конечно, тоже палиндром, более того, реплика в данном случае идентична матрице). Такие простейшие палиндромы еще не дают желаемого эффекта. Но если немного удлинить последовательность, чтобы она состояла не из двух блоков, а из трех (или хотя бы из двух с половиной), то сразу открываются интересные возможности. Рассмотрим последовательность 5'-GGACCU.AGGUCC.GGAC-3'. Две такие последовательности могут, в соответствии с принципом комплементарности, соединиться разными способами.

Способ первый:



В этом случае НР не происходит, потому что у молекул нет «недостроенных» 3'-концов. Но исходные молекулы могут соединиться и по-другому:



Тогда обе молекулы могут послужить праймерами для НР. Их 3'-концы, присоединенные к матрицам (отмечены стрелками), будут достроены, и получим следующее:



Затем эти две последовательности (они, между прочим, одинаковые: в мире палиндромных повторов матрица и реплика идентичны, когда число блоков четное) разведутся в горячей фазе цикла, а потом смогут снова склеиться, опять-таки по-разному. Если по всей длине, то НР не пойдет и придется ждать следующей горячей фазы:



Если внахлест со свободными 3'-концами, НР тоже не пойдет:



Если внахлест со свободными 5'-концами, то обе молекулы смогут удлиниться:



Таким образом, в определенных условиях палиндромные последовательности будут размножаться быстрее других из-за способности к взаимному праймингу. В результате получатся растущие цепи палиндромных повторов с тенденцией к бесконечному росту. Добавим к этому происходящие время от времени случайные разрывы растущих цепей, причем любой обрывок с легкостью найдет для себя комплементарный участок на другой молекуле РНК, где он сможет выступить в роли праймера и снова удлиниться. Добавим еще формирование пространственных (третичных) структур. Очень скоро растущие молекулы начнут сворачиваться в разнообразные структуры с многочисленными шпильками. При этом каждая длинная молекула, состоящая из палиндромных повторов, может сложиться не одним, а многими разными способами (в зависимости от того, какие из палиндромных блоков спарятся друг с другом). В формировании трехмерных структур могут участвовать несколько молекул вместе, так что разнообразие структур (с потенциальными функциями) по мере удлинения нитей будет стремительно расти.

Периодически будут возникать одноцепочечные 5'-кончики, которые станут служить матрицами для удлинения 3'-концов. Везде, где 3'-конец ляжет на матрицу, продолжающуюся после него, пойдет ферментативная репликация, т.е. молекулы удлинятся. В одних микроростях (или мембранных пузырьках) могут размножиться одни палиндромные повторы, в других — другие. Из-за неточности неферментативной репликации будут возникать мутации, что вызовет локальное несовершенство палиндромов. Если оно окажется сильным, НР может замедлиться (отсеется отбором), если слабым, может сохраниться и распространиться за счет дрейфа. В таком случае отбор

может поддержать компенсирующие мутации, восстанавливающие совершенство палиндрома, и разнообразие последовательностей будет расти. Нарастивание цепочек может происходить постепенно: за один цикл «горячо—холодно» здесь могут пристроиться два нуклеотида, там — четыре, тут — один, а в следующем цикле рост продолжится. Во многом это снимает проблему «медленности» НР.

Наследуемость возникающих трехмерных структур поначалу будет невысокой, поскольку каждый «генотип» (последовательность нуклеотидов) может породить много разных «фенотипов» (способов сворачивания). На первых порах это облегчит адаптивную эволюцию, ведь неудачные вариации не будут жестко наследоваться. А случайно возникшие удачные способы сворачивания в дальнейшем смогут стабилизироваться путем закрепления мутаций, повышающих вероятность именно такого сворачивания (это напоминает известный эволюционный механизм «генокопирования модификаций»).

Достоинства модели «палиндромного мира», по-видимому, следующие:

- снимается проблема праймеров (она перестает быть проблемой и становится двигателем отбора в «мире НР»);
- обеспечивается рост и размножение последовательностей, которые легко образуют разнообразные трехмерные структуры («шпильки» — классический элемент всех рибозимов — основаны на палиндромах), что повышает вероятность появления функциональных рибозимов;
- формирование шпилек повышает устойчивость молекул РНК;
- даже самый ничтожный обрывок последовательности не пропадет, а послужит для дальнейшего роста цепочек: ведь он найдет себе комплементарную матрицу, к которой сможет присоединиться, чтобы подвергнуться удлинению при помощи НР.

Наконец, в один прекрасный момент в какой-то микрополости или протоклетке появится такой палиндром-мутант, который будет хоть чуть-чуть ускорять (катализировать) НР. Может быть, этот палиндром-мутант сможет взаимодействовать с абиогенным пептидом, содержащим несколько остатков аспарагиновой кислоты, которые удерживают ион магния или цинка. Содружество РНК с пептидами могло зародиться очень рано. С этого момента — с появления, пусть в самом зачаточном виде, РНК-полимеразной функции — начинается переход от «мира НР» к настоящему миру РНК.

Таким образом, есть основания предполагать очень раннее появление репликаторов, а значит, и ранний старт дарвиновской эволюции. После этого прохождения всех последующих этапов пути

к первой живой клетке принципиально упрощается. Скорее всего, в истории земной жизни никогда не было того сомнительного этапа, на котором из случайных последовательностей нуклеотидов должна была сама собой, как Афродита из морской пены, родиться полнофункциональная РНК-полимераза. Более правдоподобной выглядит гипотеза, согласно которой естественный отбор начал направлять добиологическую эволюцию задолго до появления первых эффективных рибозимов.

Чтобы обосновать эту гипотезу, необходимо доказать, что условия для эффективной НР, во-первых, возможны, во-вторых, действительно когда-то существовали. Сделать это нелегко, но динамика научных открытий, совершаемых в последние годы, дает основания для осторожного оптимизма. ■

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Проект № 14-14-00330.

Литература

1. Gulik P. van der, Massar S., Gilis D. et al. The first peptides: the evolutionary transition between prebiotic amino acids and early proteins // *J. Theor. Biol.* 2009. V.261. P.531—539.
2. Attwater J., Wochner A., Holliger P. In-ice evolution of RNA polymerase ribozyme activity // *Nat. Chem.* 2013. V.5. P.1011—1018. doi:10.1038/nchem.1781
3. Wochner A., Attwater J., Coulson A. et al. Ribozyme-Catalyzed Transcription of an Active Ribozyme // *Science*. 2011. V.332. P.209—212. doi:10.1126/science.1200752
4. Кунин Е.В. Логика случая. О природе и происхождении биологической эволюции. М., 2014.
5. Szcepanski J.T., Joyce G.F. A cross-chiral RNA polymerase ribozyme // *Nature*. 2014. V.515. P.440—442. doi:10.1038/nature13900
6. Briones C., Stich M., Manrubia S.C. The dawn of the RNA World: Toward functional complexity through ligation of random RNA oligomers // *RNA*. 2009. V.15. P.743—749. doi: 10.1261/rna.1488609
7. Huang W., Ferris J.P. One-step, regioselective synthesis of up to 50-mers of RNA oligomers by montmorillonite catalysis // *J. Am. Chem. Soc.* 2006. V.128. P.8914—8919.
8. Paul N., Joyce G.F. A self-replicating ligase ribozyme // *PNAS*. 2002. V.99. №20. P.12733—12740. doi:10.1073/pnas.202471099
9. Lincoln T.A., Joyce G.F. Self-sustained replication of an RNA enzyme // *Science*. 2009. V.323. №5918. P.1229—1232. doi:10.1126/science.1167856
10. Vaidya N., Manapat M.L., Chen I.A. et al. Spontaneous network formation among cooperative RNA replicators // *Nature*. 2012. V.491. P.72—77. doi:10.1038/nature11549
11. Acevedo O.L., Orgel L.E. Non-enzymatic transcription of an oligodeoxynucleotide 14 residues long // *J. Mol. Biol.* 1987. V.197. P.187—193. doi:10.1016/0022-2836(87)90117-3
12. Orgel L.E. Prebiotic chemistry and the origin of the RNA world // *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* 2004. V.39. №2. P.99—123. doi:10.1080/10409230490460765
13. Adamala K., Szostak J.W. Nonenzymatic template-directed RNA synthesis inside model protocells // *Science*. 2013. V.342. P.1098—1100. doi:10.1126/science.1241888
14. Szostak J.W. The eightfold path to non-enzymatic RNA replication // *J. Sys. Chem.* 2012. V.3. P.2—15. doi:10.1186/1759-2208-3-2
15. Engelbart A.E., Powner M.W., Szostak J.W. Functional RNAs exhibit tolerance for non-heritable 2'—5' versus 3'—5' backbone heterogeneity // *Nature Chemistry*. 2013. V.5. P.390—394. doi:10.1038/nchem.1623
16. Ricardo A., Szostak J.W. Origin of life on Earth // *Sci. Am.* 2009. V.301. P. 54—61.
17. James K.D., Ellington A.D. Surprising fidelity of template-directed chemical ligation of oligonucleotides // *Chem. Biol.* 1997. V.4. №8. P.595—605.
18. Powner M.W., Gerland B., Sutherland J.D. Synthesis of activated pyrimidine ribonucleotides in prebiotically plausible conditions // *Nature*. 2009. V.459. P.239—242. doi:10.1038/nature08013
19. Butch C., Cope E.D., Pollet P. et al. Production of tartrates by cyanide-mediated dimerization of glyoxylate: a potential abiotic pathway to the citric acid cycle // *J. Am. Chem. Soc.* 2013. V.135. P.13440—13445. doi:10.1021/ja405103r
20. Bokov K., Steinberg S.V. A hierarchical model for evolution of 23S ribosomal RNA // *Nature*. 2009. V.457. P.977—980. doi:10.1038/nature07749

Наноэлектроника и радиация

П.А.Александров, В.И.Жук, В.Л.Литвинов

В течение многих лет развития твердотельной электроники разработчики последовательно уменьшают размеры активных приборов (диодов, транзисторов) и пассивных компонентов (проводников, конденсаторов и др.). Эта тенденция обусловлена двумя главными причинами — стремлением максимально сконцентрировать приборы на единице площади, что позволяет увеличить функциональные возможности малого объема микросхемы*, и потребностью в повышении быстродействия. Но снижение размеров элементов неизбежно влечет за собой изменение отношения поверхность/объем, перераспределяя роль факторов, влияющих на работу прибора [1, 2]. Один из таких внешних факторов — радиация.

Угроза облучения и технологическая защита

В реальной жизни все электронные схемы работают в условиях облучения. Это фоновое излучение, идущее от земной поверхности из-за естественной радио-

* Здесь термин «микросхема» выбран в качестве краткого общего названия интегральной схемы, относящейся как к нано-, так и микроэлектронике, поскольку предлагаемый подход и основанные на нем способы резервирования предназначены для использования и там, и там.



Петр Анатольевич Александров, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института информационных технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Область научных интересов — физика поверхности и нанотехнологии.



Виктор Ильич Жук, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник того же института. Специалист по вычислительной технике, в частности по методам повышения надежности вычислительных систем.



Валерий Лазаревич Литвинов, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник того же института. Занимается радиационной физикой твердого тела, физикой полупроводников и полупроводниковых приборов.

активности пород; излучение, связанное с выходящим из глубины земли радоном; излучение от радиоактивных примесей в полупроводниковых и других материалах, используемых в интегральной схеме, и, наконец, космическое фоновое излучение. Если размер приборов достаточно «большой», то указанное выше излучение практически не играет никакой роли. В зависимости от типа и энергии части-

цы последствия попадания ее в микросхему могут варьироваться от изменения концентрации носителей заряда из-за производимой ею ионизации (вплоть до электрического пробоя) до образования сплошных дыр из-за выбивания атомов со своих положений. «Зона поражения» вдоль трека частицы составляет от $\sim 10^{-2}$ до ~ 10 мкм. Однако деградируют характеристики весьма мало благодаря небольшому совокупному флюенсу, т.е. среднему количеству частиц, попавших в 1 см^2 микросхемы за время облучения: в естественных земных условиях интенсивность излучения (число частиц, приходящихся в единицу времени на единицу площади) лежит в диапазоне от единиц до сотен. Зато для специальной электроники, работающей в космической и атомной технике, эта интенсивность, как и полный флюенс, получаемый за все время работы микросхемы, на много порядков больше, чем обычный фон. В этом случае деградация параметров прибора приводит к отказу микросхемы.

Как же можно противостоять такой деградации? Один путь — резервирование аппаратуры (использование одинаковых устройств, работающих одновременно). Другой путь — технологический, допускающий разные варианты. Во-первых, использовать в приборах высокие электрические поля (что дает уменьшение рассеяния носителей заряда на дефектах), а также основные носители заряда и материалы с высоким уровнем легирования (относительное изменение концентрации носителей, и так значительной изначально, под действием радиации будет в этом случае невелико). Во-вторых, строить устройства на основе эффектов, слабо зависящих от облучения (фазовых переходов в халькогенидных стеклах и сегнетоэлектриках, переноса спина вместо переноса зарядов и т.д.). К приборам первого рода относятся полевые транзисторы с *p-n*-переходом, стабилитроны, туннельные диоды, к приборам второго рода — переключатели на халькогенидных стеклообразных полупроводниках, сегнетоэлектриках и др.

Проиллюстрируем сказанное на простом графике (рис.1). Без облучения, т.е. при нулевом флюенсе, не все приборы изначально работоспособны по разного рода технологическим причинам. Поэтому вероятность безотказной работы микросхемы, как показано на рис.1,а, уже немного ниже единицы. При облучении по мере роста флюенса частицы создают в приборах микросхемы и на границах разделов между составляющими их материалами дефекты и наведенные заряды. Однако благодаря относительно большому размеру прибора действия разных частиц усредняются, и внезапный отказ вследствие попадания одной частицы произойти не может. Зависимость вероятности отказа отдельного прибора, входящего в микросхему, и вероятности отказа всей микросхемы от флюенса будет плавной (а не ступенчатой).

Помимо активных приборов в микросхеме присутствует заметное количество (превышаю-

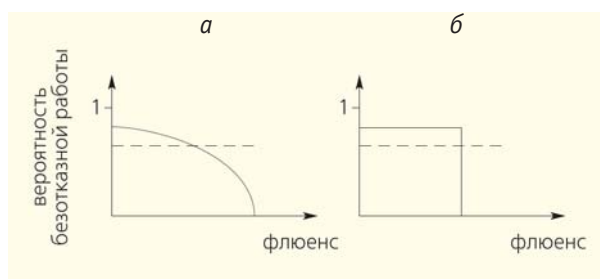


Рис.1. Зависимость вероятности безотказной работы электронного устройства от полного флюенса: а — для микросхем с приборами «большого» размера, б — для случая нанoeлектроники. Пунктиром показана допустимая вероятность безотказной работы.

щее число приборов) межсоединений, обеспечивающих электрический контакт между ними, — обычно металлических проводов. Хорошо известно, что если активные приборы достаточно «большие», то межсоединения тоже имеют большое сечение и поэтому устойчивы к облучению.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод: при «большом» размере приборов и при гипотетическом идеальном условии, что все они одинаковы и деградируют с одинаковой скоростью, резервирование с целью только повысить радиационную устойчивость малоэффективно и неоправданно. Действительно, при равной скорости деградации всех приборов ставить рядом с резервируемым основным узлом такие же приборы, микросхемы и целые компьютеры, чтобы повысить стойкость к радиации, смысла не имеет, так как они выходят из строя точно так же, как и основной узел. Но в нанoeлектронике ситуация складывается совершенно другая.

Переходим к нанoeлектронике

Сегодня от лабораторной практики создания нанoeлектронных приборов и микросхем на их основе переходят к их промышленному производству. На этом этапе изучение действия облучения на микросхемы в условиях, приближенных к реальным, становится актуальным. Для реальных условий особенно важно увеличение степени интеграции до 10^{11} — 10^{12} приборов на 1 см^2 и соответствующее ему уменьшение размеров приборов. Но при такой миниатюризации результат действия излучения на приборы существенно изменяется. Зададимся вопросом, что произойдет, когда область поврежденный, создаваемая одной частицей, будет примерно того же размера, что и прибор (а это и происходит при переходе к нанoeлектронике)?

Сначала рассмотрим, что случится с межсоединениями, в нашем случае с нанопроводами. При попадании частицы в провод малого сечения возможны локальное плавление, образование де-

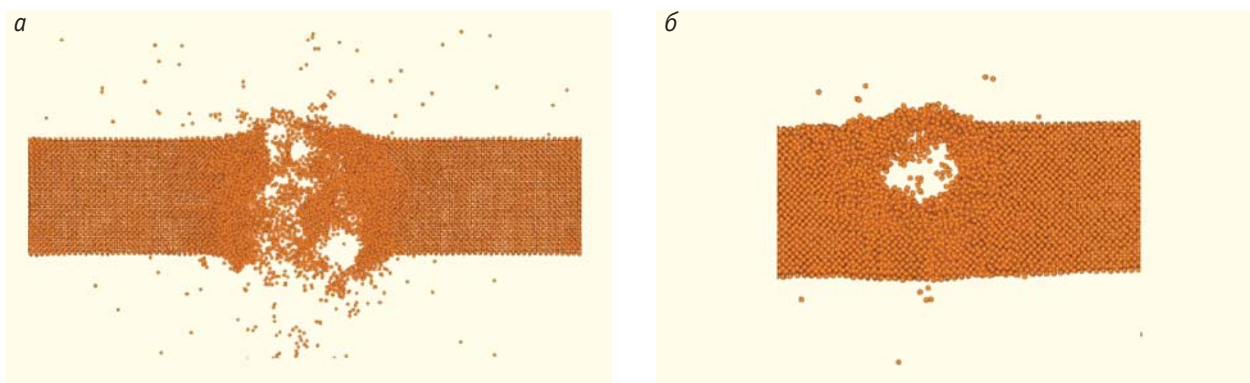


Рис.2. Разрыв медного нанопровода в результате бомбардировки атомами Ar с начальной энергией 20 кэВ; а — разрыв, б — отверстие.

фектов, дырок, сравнимых по размеру с размерами сечения провода, и, наконец, его полный разрыв. В работе [3] были проведены численные расчеты по проверке модельных представлений о действии излучения на металлические нанопровода. Методом молекулярной динамики [4] моделировалось облучение медных проводников ионами Ar⁺ с энергией 20 кэВ. Основные выводы из этих расчетов сводятся к следующим.

Ионы Ar⁺ в подавляющем большинстве случаев «прошивают» нанопроводник и уносят основную часть энергии в окружающее пространство, теряя в подложке ее часть (~1 кэВ).

Наблюдаются повреждения двух типов. Первые — крупные критические повреждения, представляющие собой разрывы и/или отверстия большого диаметра. Вторые — точечные дефекты в объеме образца, распыленные атомы меди и поверхностные повреждения (изменения шероховатости, появление горбов и кратеров).

Доля крупных дефектов зависит от прилегающего объема (в частности, подложки). В данном случае их было не так много, а влияние кремниевой подложки особенно сказывалось в случае разрывов. Отметим, что наличие разрывов и отверстий определялось «визуально» по рассчитанным картинкам расположения атомов и что сопротивление проводников специально не вычислялось, но надо полагать, оно резко меняется.

Условия и результаты расчетов, размеры и форма проводников, первичные повреждения

и некоторые их характеристики приведены в таблице и иллюстрируются на рис.2.

Полученные результаты хорошо согласуются с изложенными в работах [3, 4] представлениями о радиационных повреждениях в нанoeлектронных материалах. Здесь в первую очередь надо обратить внимание на появление разрывов. Если провод или прибор находится на подложке и поток частиц направлен сверху вниз, то вторичные частицы, генерируемые этим потоком, будут двигаться преимущественно тоже вниз, производя дефекты в подложке, что мало влияет на работу вышележащего провода или прибора. В обратном случае (подложка находится сверху) вторичные частицы, рожденные в подложке, дают максимальное дефектообразование в проводе или приборе. Из таблицы видно, что количество дефектов типа «разрывы», приводящих к отказам в работе провода или прибора, для случая «под подложкой» больше, чем в случае «на подложке».

Отмеченные выше перемены геометрии межсоединений могут приводить к «резким» изменениям их свойств при попадании отдельных частиц. Это, прежде всего, увеличение сопротивления межсоединений и снижение их теплоотдачи. Рост сопротивления обусловлен увеличением поверхностного рассеяния, искажением распределения электрического поля из-за критических дефектов и, конечно, самим уменьшением локального геометрического сечения проводника, вплоть до обрыва. Поскольку теплопроводность

в металлических проводниках определяется переносом электронов, указанные эффекты будут увеличивать и их тепловое сопротивление. Нетрудно видеть, что даже в рамках классических представлений электрическое и тепловое сопротивление при типичных параметрах для меди могут увеличиваться в разы и при отсутствии обрыва. Кроме того, локальное увеличе-

Таблица

Доля критических дефектов медного нанопровода в трех случаях его расположения (кремниевая подложка 15.6×13.4×6.7 нм — 71 150 атомов, медь 5.2×12.8×1.6 нм — 10 710 атомов; метод молекулярной динамики, 4000 случаев)

Дефекты, %	Расположение нанопровода		
	в вакууме	на подложке	под подложкой
Разрывы	0.2	0.1	0.3
Отверстия	7.6	6.4	5.9
Всего дефектов	7.8	6.5	6.2

ние температуры может усилить электромиграцию в меди и привести к последующим «вторичным» отказам (вплоть до обрыва) в ходе работы во время облучения.

Это рассмотрение приводит нас к выводу, что в наноэлектронике межсоединения так же важны с точки зрения отказоустойчивости, как и приборы. Даже без расчетов ясно, что в таких компонентах внезапный отказ может произойти при попадании всего одной частицы. Это связано с тем, что наименьший размер прибора в наноэлектронике (как и минимальный радиус межсоединений) составляет единицы нанометров, как и размер области повреждений, например, от одного нейтрона. В этом случае вместо плавной кривой с рис. 1,а будем иметь кривую со скачкообразным (резким) изменением отказоустойчивости. При малых флюенсах все работает нормально, но при накоплении дозы частица в конце концов попадет в прибор или в межсоединение и они выйдут из строя, приводя к отказу всей микросхемы (см. рис. 1,б).

Хорошим примером может служить ступенчатое изменение электрического потенциала так называемых одноэлектронных приборов при добавлении одного электрона. Очевидно, что если рядом с таким прибором пролетит ионизирующая частица, количество электронов может увеличиться и работа прибора будет нарушена.

Таким образом, для наноразмерных приборов существуют два механизма выхода из строя. Один из них связан с уже упомянутым ранее (действующим и в микроэлектронике) механизмом постепенного ухудшения параметров и дальнейшим отказом. Здесь это происходит, когда частицы попадают не в сам прибор, а в прилегающий объем — например, в подложку (где может произойти разmultiplication числа частиц, изменение границ раздела различных материалов). При этом характерные дозы/флюенсы могут быть очень большими. Они зависят от технологии изготовления приборов и для специальной электроники в атомной и космической технике оказываются на много порядков большими, чем дозы/флюенсы фонового излучения [5]. Второй из этих механизмов заключается во внезапном отказе прибора или межсоединения при попадании в него единственной частицы.

Оценим значимость второго механизма, когда частица попадает в прибор или межсоединение в микросхеме, состоящей из N компонентов, при условии, что отказ одного из этих компонентов приводит к выходу из строя всей нерезервированной микросхемы.

Вычисляем вероятность отказа микросхемы

Для упрощения задачи примем, что площадь S микросхемы полностью покрыта составляющими ее компонентами, каждый из которых может выйти

из строя при попадании в него одной частицы. Пусть все они занимают одинаковую площадь и имеют одинаковую вероятность отказа при попадании в них частицы (сложность и функции этих компонентов могут быть различными). В качестве компонентов могут выступать логические элементы либо их детали (приборы, например, транзисторы, диоды, сопротивления), а также межсоединения.

Тогда вероятность отказа нерезервированной микросхемы вследствие отказа любого ее компонента будет $P_1 = \Phi \cdot S \cdot W$, где Φ — флюенс, S — площадь микросхемы; W — вероятность отказа одного компонента при попадании в него одной частицы.

Флюенс выражается через интенсивность облучения I и время облучения t до момента отказа микросхемы с вероятностью P_1 , как $\Phi = I \cdot t$.

Вероятность W может быть представлена в виде $W = \sigma \cdot n \cdot d \cdot f$, где σ — сечение взаимодействия облучающей частицы с атомами вещества микросхемы, n — число атомов вещества микросхемы в 1 см^3 ; d — средняя толщина материала компонента, принимаемая постоянной; f — константа, учитывающая влияние множества факторов, к которым относятся, в частности, вид и энергия частиц, угол их падения на плоскость, где расположена микросхема, ее геометрия и тип материалов, из которых она изготовлена, электрические условия ее работы и другие факторы. Если $f = 1$, то каждая частица, испытавшая взаимодействие, т.е. попавшая в компонент микросхемы, вызывает его отказ. В действительности же $f < 1$ (не каждая частица выводит компонент из строя). При выборе значения этой константы важно учесть, что при попадании одной частицы в микросхему к ее внезапному отказу приводят не только неисправности типа обрыва или короткого замыкания, но и сильные изменения параметров компонентов микросхемы. Поскольку расчет f сопряжен с большими неопределенностями, в конкретных случаях целесообразно определять ее значение экспериментально. Ниже для оценки примем $f = 1$, хотя выбор другого значения этой константы принципиально ничего не меняет в рассматриваемом подходе.

Приведем пример вычисления вероятности W . Например, если частицы — это нейтроны, характерное значение сечения взаимодействия составляет $\sigma = 10^{-24} \text{ см}^2$. Примем, что $n = 5 \cdot 10^{22}$ атомов/см³, $d = 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ (т.е. примерно 100 атомных слоев), $f = 1$. С учетом этого $W = 1.5 \cdot 10^{-7}$, а при $S = 1 \text{ см}^2$ получим $P_1 = \Phi \cdot 1.5 \cdot 10^{-7}$.

Если требуемая вероятность безотказной работы микросхемы составляет $1 - P_1 \sim 0.9999$, допустимый флюенс будет $\Phi = 10^3/1.5$.

Для других частиц, например, протонов, тяжелых ядер, величина σ увеличивается на 2–4 порядка и допустимый флюенс Φ уменьшается во столько же раз.

Полученные значения флюенса оказываются очень малыми — сравнимыми с флюенсом естественного фона (за время безотказной работы с указанной выше вероятностью) и весьма далекими от требований, предъявляемых к условиям работы при использовании электроники, например, в атомной или космической технике. Отсюда следует вывод, что надежность наноэлектронных систем сильно ограничена и явно недостаточна, если не принять специальные меры. Примером может служить действие на микросхемы тяжелых заряженных частиц. Даже редкие их попадания в элементы твердотельной электроники (в космосе) выводят последние из строя. В случае наноэлектроники такую же роль будут играть нейтроны, альфа-частицы и даже гамма-кванты, которых много больше, чем тяжелых заряженных частиц.

Упомянутые выше отказы двух типов (постепенный отказ вследствие деградации параметров приборов и внезапный отказ вследствие попадания частицы в прибор малого размера) существуют одновременно, и вес (значимость) каждого из них зависит от размера приборов. Если в микроэлектронике, где приборы «большие», внезапного отказа под действием облучения вообще не происходит, в наноэлектронике, где приборы имеют «малый» размер, наоборот, он может превалировать. Иначе говоря, частица попадает в какой-либо прибор и может сразу вызвать его отказ. Очевидно, все это справедливо при большой интеграции, когда в облучаемой микросхеме приборов очень много. Если в облучаемом устройстве элементов мало (или вообще один), частица может никогда (за время эксплуатации) не попасть в них, и такое устройство будет работать безотказно. Когда же элементов очень много, малую вероятность попадания частицы в отдельный прибор надо умножить на их число, и мы получим ограниченную работоспособность микросхемы. Возникает вопрос, что же делать?

В поисках выхода

В последнее десятилетие в западной литературе появилось много работ, посвященных построению отказоустойчивых наноэлектронных дискретных систем на основе использования различных способов постоянного резервирования, т.е. такого резервирования, при котором все имеющиеся узлы работают одновременно [6—8]. Эти работы восходят к принципу построения надежных схем из ненадежных элементов, предложенному еще в 1952 г. Дж. фон Нейманом [9]. В основном это способы k -кратного ($k \geq 3$) постоянного резервирования, когда резервированный узел строится из k резервируемых узлов, на выходах которых устанавливаются так называемый мажоритарный клапан (majority gate). Он формирует выходной сигнал по принципу «голосования»: вер-

ным считается выходной сигнал, соответствующий большинству выходных сигналов k резервируемых узлов. Из этих способов чаще всего используют резервирование при $k = 3$, называемое троированием. На рис.3 показан троированный узел 3, состоящий из трех резервируемых узлов 1 и установленного на их выходах мажоритарного клапана 2, схема которого содержит четыре логических элемента «ИЛИ-НЕ» либо «И-НЕ» (три двухвходовых и один трехвходовой) [10, с.106].

Казалось бы, выход найден. Однако под воздействием радиации в резервированном узле могут отказать мажоритарный клапан и большинство резервируемых узлов. Главное препятствие к применению способов k -кратного ($k \geq 3$) постоянного резервирования — недостаточная надежность мажоритарного клапана, который может отказывать так же, как и остальная аппаратура. Но есть и другие недостатки этих способов. Они требуют больших затрат аппаратуры и ограничивают уменьшение масштаба резервирования, поскольку в одном резервированном узле суммарное количество аппаратуры (например, число транзисторов) в резервируемых узлах должно значительно превышать аппаратные затраты на мажоритарный клапан, т.е. резервируемые узлы не могут быть слишком маленькими. Кроме того, последовательное соединение резервированных узлов, необходимое для построения более сложных логических устройств, приводит к потере быстродействия за счет потерь времени задержки в мажоритарных клапанах. Добавим к этому, что в указанных работах по k -кратному ($k \geq 3$) резервированию влияние облучения на наноэлектронные схемы вообще не рассматривается.

Таким образом, поиск выхода, т.е. способа обеспечить отказоустойчивость наноэлектронной интегральной схемы под действием радиации, должен быть продолжен.

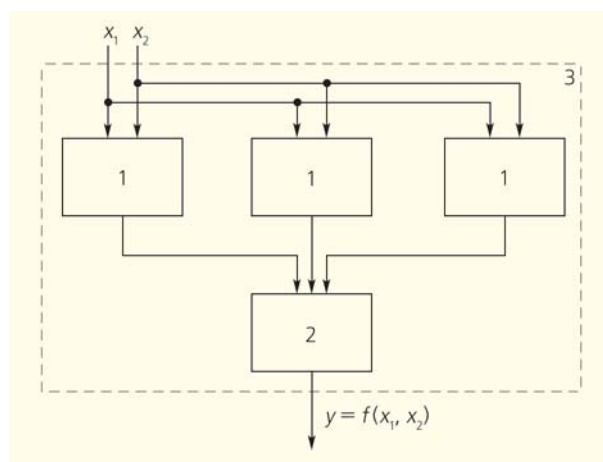


Рис.3. Схема троированного узла. 1 — одинаковые резервируемые узлы, 2 — мажоритарный клапан, 3 — троированный узел.

Поскольку поражение отдельных компонентов микросхемы носит вероятностный характер (первая частица попадает в любое место микросхемы, вторая — также в любое, независимо от того, куда попадает первая), возникает идея продублировать компоненты микросхемы, положенная в основу разработанного нами способа постоянного покомпонентного дублирования [11, 12].

Мы предлагаем пару одинаковых, дублирующих друг друга, компонентов 1 объединить в один дублированный компонент 2, имеющий один общий выход (рис.4). Одно из отличий нашего способа от обычного дублирования состоит в том, что в указанной паре соединены не только входы обоих дублирующих компонентов, но и их выходы. Оба дублирующих компонента в паре работают *одновременно и независимо один от другого*. При этом необходимо обеспечить, чтобы каждый из них при отказе второго выполнял ту же функцию, как и в целом дублированный компонент 2. На рис.4 компоненты 1 и 2 вычисляют одну и ту же логическую функцию $y = f(x_1, x_2)$. Это условие можно выполнить при помощи дополнительных затрат аппаратуры (количества дополнительных транзисторов) в дублирующем компоненте. Известно, что выходы обычных логических элементов непосредственно объединять нельзя [10, с.16]. Однако этот запрет снимается путем модификации выходного каскада логических элементов с использованием дополнительных аппаратных затрат. В качестве компонентов в предложенном методе могут выступать логические элементы, приборы (например, транзисторы) и межсоединения — в отличие от k -кратного ($k \geq 3$) резервирования, где резервируемые компоненты должны быть гораздо более сложными и могут представлять собой довольно крупные узлы. Можно показать, что уменьшение масштаба резервирования, т.е. снижение сложности резервируемого компо-

нента, ведет к увеличению отказоустойчивости системы.

Другое существенное отличие предложенного способа касается взаимного размещения дублирующих друг друга компонентов, составляющих дублированную пару. Каждый компонент предлагается размещать на расстоянии от дублирующего его компонента, большем, чем область повреждения микросхемы от одной частицы. В этом случае одна частица не может разрушить сразу оба одинаковых компонента в паре. Найдем вероятность отказа микросхемы, построенной таким способом.

Отказ любого (одного) компонента микросхемы при попадании в него частицы не приведет к ее выходу из строя, если продолжит оставаться исправным дублирующий его компонент. Микросхема с дублированными компонентами перестанет работать, только если откажут сразу оба компонента хотя бы одной пары, составляющей дублированный компонент. Вероятность такого события будет $P_2 = P_1^2/N$, где P_1 — вероятность отказа одного дублирующего компонента в паре, N — количество пар дублирующих друг друга компонентов в микросхеме. Подчеркнем, что здесь P_1 — вероятность отказа хотя бы одного дублирующего компонента в их подмножестве, содержащем половину компонентов дублированной микросхемы и состоящем из N непарных компонентов. Она определяется приведенной выше первой формулой, где S — половина площади микросхемы, в которой все компоненты дублированы.

Для случая, когда площадь дублирующего компонента совпадает с площадью компонента в нерезервированной микросхеме, половина дублированной микросхемы будет совпадать с площадью последней. Тогда при вероятности отказа P_1 , связанной в нашем примере с флюенсом множителем $1.5 \cdot 10^{-7}$, и при $N = 10^{12}$ для случая нейтронов получим вероятность отказа $P_2 = 2.25 \cdot \Phi^2 \cdot 10^{-26}$.

Если принять для микросхемы с дублированием то же значение вероятности безотказной работы, которая была принята раньше для микросхемы без дублирования: $1 - P_2 \sim 0.9999$, получим, что допустимый флюенс составит теперь $\Phi = 10^{11}/1.5$, т.е. возрос в по сравнению с таковым для микросхемы без дублирования 10^8 раз! Это означает, что при той же интенсивности облучения возросло в 10^8 раз допустимое время облучения.

Ограничение на такой способ дублирования заключается в том, что дублирующие компоненты не должны иметь в своем составе элементов памяти, т.е. триггеров (при выходе из строя одного компонента его исправный дублер «не знает», в каком из состояний тот находился). Но оно легко обходится схемотехническим решением: элемент памяти строится из двух дублированных логических элементов «ИЛИ-НЕ» либо «И-НЕ» — так же, как строятся триггеры из обычных (недублированных) логических элементов.

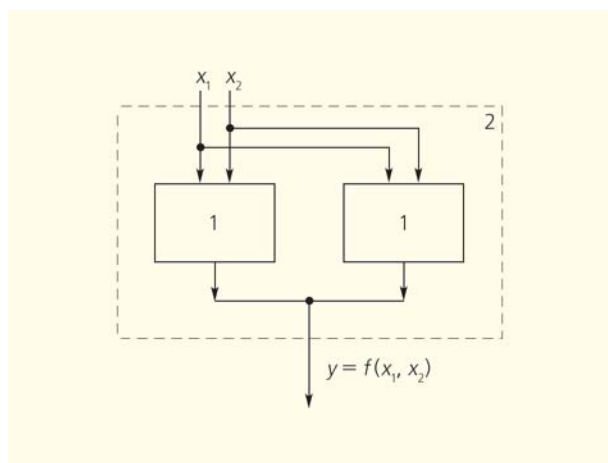


Рис.4. Схема дублированного логического элемента. 1 — одинаковые дублирующие компоненты, 2 — дублированный компонент.

На первый взгляд может показаться, что требование иметь расстояние между компонентами больше, чем размер области повреждения от одной частицы, приведет к существенному падению интеграции всей микросхемы. Однако легко показать, что это не так. Можно построить топологию микросхемы таким образом, чтобы разные пары компонентов «перекрывались», т.е. чтобы расстояние между компонентами, принадлежащими разным парам, было меньше размера области повреждения от одной частицы. Тогда, если два компонента будут выведены из строя одной частицей, но они будут из разных пар, их отказ не повлияет существенным образом на отказоустойчивость, а высокая степень интеграции будет сохранена. Это хорошо видно на примере дублирования межсоединений (рис.5).

Итак, дублирование микросхем предложенным способом может радикально повысить их отказоустойчивость при облучении, вследствие чего дублированные нанoeлектронные микросхемы становятся работоспособными не только при естественном фоне облучения, но и при гораздо большем облучении. Вполне понятно, что повреждения, влияние которых на отказы снимается при помощи дублирования, могут быть связаны не только с облучением, но и с технологическими причинами.

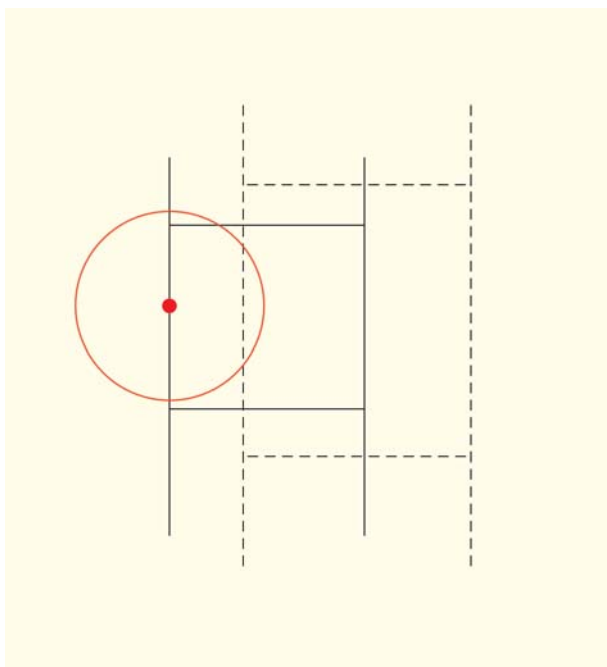


Рис.5. Дублирование межсоединений с перекрытием. Кругок представляет область повреждений от одной частицы. Пара дублирующих друг друга межсоединений, изображенная сплошной линией, перекрывается второй парой межсоединений, показанной пунктиром. В результате повреждается один компонент (межсоединение) в каждой паре, но обе пары продолжают функционировать.

Вернемся к микроэлектронике

Вывод о неэффективности резервирования электронной аппаратуры для повышения отказоустойчивости в микроэлектронике как средства защиты только от воздействия облучения был сделан в самом начале статьи в идеальном гипотетическом предположении, что все приборы одинаковы и одинаково меняют свои параметры с флюенсом. Если от него отказаться, ситуация с оценкой отказоустойчивости может сильно измениться. Действительно, хотя в подавляющем большинстве приборы в микросхеме одинаковы, небольшая их часть, соответствующая «хвостам» статистического распределения параметров этих элементов, может существенно отклоняться по величинам каких-то параметров от среднего значения. Отклонения могут касаться не измеряемых при тестировании параметров или быть вблизи края допустимой области значений тестируемых величин. Обычно они обусловлены дефектами, которые связаны с качеством технологических сред, пылью, дефектами в исходных пластинах, несовершенством технологий (в первом приближении можно считать их вероятностно независимыми). Очевидно, что часть таких дефектов будет повышать чувствительность приборов к облучению. Таким образом, имеется относительно небольшое количество скрытых дефектов, не обнаруженных при тестировании, но при эксплуатации приводящих к отказам, связанным с облучением. Отсюда можно сделать вывод, что отказы в микроэлектронике под воздействием облучения обусловлены именно указанными дефектами быстро деградирующих приборов. Он подтверждается тем, что существует сильный разброс радиационной стойкости (допустимых дозы или флюенса) одинаковых микросхем и отдельных приборов в одной микросхеме. Вследствие этого резервирование в микроэлектронике как средство защиты от воздействия излучения тоже полезно: оно позволяет довести радиационную стойкость микросхемы до стойкости основного количества «хороших» приборов.

На первый взгляд существует и более простое решение проблемы с отказоустойчивостью, чем резервирование: надо всего лишь окружить электронный блок непроницаемым для частиц экраном. Однако это не всегда возможно. Например, заряженные частицы в космосе имеют энергию до 10^{20} эВ, вследствие чего требуемая толщина соответствующего экрана становится нереально большой. Кроме того, всегда присутствует очень малая примесь естественных радиоактивных веществ, как в самих приборах, так и в экране. Поэтому для нанoeлектроники, где очень существенно влияние отдельных частиц, такая защита работать не будет; для микроэлектроники, где играет роль флюенс, попадающий на микросхему, последний

можно несколько понизить, используя такую защиту, и тем самым повысить отказоустойчивость.

* * *

Огромные усилия, которые тратятся сейчас на уменьшение размеров приборов, даже если и позволят сделать микросхему сверхвысокой интеграции на наноразмерных элементах, не помогут сами по себе справиться с ее ограниченной радиационной отказоустойчивостью из-за неустраняемых физических причин. Такие микросхемы будут неприменимы не только в специальных условиях (в космосе, в атомной промышленности), но и в обычных компьютерах. К сожалению, этот вывод не зависит от физического принципа, на котором будут работать наноприборы: все зависит от их размера. Выходом из этого положения может быть использование постоянного покомпонентного дублирования, желательно на воз-

можно более низком функциональном уровне компонентов микросхемы, или, иначе говоря, дублирование возможно более мелкого масштаба.

Один из авторов этой статьи какое-то время назад был на семинаре, где докладчик рассматривал действие тяжелых заряженных частиц в космосе на электронную аппаратуру. Был сделан вполне понятный вывод о неизбежном выходе ее из строя. Докладчику был задан вопрос: «А как же американский “Вояджер-1”, он уже 30 лет летит и все время работает?». Прозвучал логичный ответ: «Элементная база этого аппарата была сделана 35 лет назад, а тогда приборы были большого размера, и отдельные частицы не могут их разрушить». Этот пример показывает, что, хотя стойкости к облучению и размеров приборов и признается, далеко не всегда учитывается, что для приборов предельно малых размеров она становится определяющей. ■

Литература

1. Silicon nanoelectronics / Eds. S.Oda and D.Ferry. L., 2006.
2. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. М., 2007.
3. Александров П.А., Баранова Е.К., Баранова И.В. и др. Отличия воздействия излучения на наноэлектронные материалы, приборы, схемы и на их микроэлектронные аналоги // Нано- и микросистемная техника. 2012. №4. С.2—11.
4. Schrimpf R.D., Fleetwood D.M., Alles M.L. et al. Radiation effects in new nanomaterials for nanodevices // Microelectronic Engineering. 2011. V.88. №7. P.1259—1264.
5. Зебрев Г.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М., 2010.
6. Han J., Jonker P.A. Fault-tolerant technique for nanocomputers: NAND multiplexing // Proc. ASCI 2002. The Eighth Annual Conference of the Advanced School for Computing and Imaging, 2002. P.59—66.
7. Bhaduri D., Shukla S., Graham P., Gokhate M. Comparing reliability redundancy trade-offs for two von Neuman multiplexing architectures // IEEE Trans. on Nanotechnology. 2007. V.6. №3. P.265—279.
8. Nicolic K., Sadek A., Forsbaw M. Fault-tolerant techniques for nanocomputers // Nanotechnology. 2002. V.13. P.357—362.
9. фон Нейман Дж. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент / Автоматы. М., 1956. С.68—139.
10. Угрюмов Е.П. Цифровая техника. СПб., 2010.
11. Александров П.А., Жук В.И., Литвинов В.Л. Способ постоянного поэлементного дублирования в дискретных электронных системах (варианты). Патент РФ на изобретение №2475820 от 10.08.2011, классы МПК G06F 11/16, H03K 19/007.
12. Александров П.А., Бударягин В.В., Жук В.И., Литвинов В.В. Об отказоустойчивости наноэлектронных интегральных схем при облучении // Нано- и микросистемная техника. 2014. №1. С.7—14.

Насекомые и бионика: загадки зрительного аппарата

А.В.Сергеев, А.С.Благодатский

С момента возникновения жизни на Земле эволюция была главной движущей силой совершенствования живых организмов. С появлением человека началось технологическое развитие. Оно позволяет людям конструировать потрясающие вещи, аналогов которым в природе просто не существует. Значит ли это, что человек превзошел природу? Пожалуй, нет. За миллиарды лет эволюция испробовала невообразимое количество механизмов и способов взаимодействия между живыми существами и окружающей средой. И очень часто эти решения настолько уникальны, что встает правомерный вопрос: смог бы до этого додуматься человек? Направление в науке, которое заимствует биологические принципы для применения в технике, называется бионикой (или биомиметикой). Самолет летает по такому же принципу, что и птицы, а вот вертолет — уже более «человеческое» изобретение. Если внимательно всмотреться, можно найти немало интересных решений природы, даже, например, в зрительном аппарате насекомых.

Фасеточный глаз и омматидии

Большая часть современных оптических приборов, таких как фотоаппараты и видеокамеры,

© Сергеев А.В., Благодатский А.С., 2015



Антон Владимирович Сергеев, аспирант, младший научный сотрудник Института математических проблем биологии РАН. Область научных интересов — математическое моделирование, микроскопия и обработка изображений, ДНК-нанотехнологии. Лауреат конкурса «Био/мол/текст» 2013 г.*



Артём Сергеевич Благодатский, кандидат биологических наук, сотрудник Института белка РАН. Занимается молекулярной и клеточной биологией, иммунологией, энтомологией.

сделаны по подобию человеческого глаза: свет, попадающий на собирающую линзу, фокусируется на поверхности светочувствительной матрицы, которая состоит из миллионов рецепторов. Чем больше фоторецепторов, тем большим разрешением обладает оптическая система. Интересная особенность такого зрительного аппарата в том, что изображение на матрице (сетчатке в случае человеческого глаза) первоначально перевернуто из-за собирающей линзы (хрусталика) и только после обработки (в мозге) становится таким, каким должно быть.

* Со статьей «Может ли муха стать нанотехнологом?», победившей на научно-популярном конкурсе «Био/мол/текст»-2013 в номинации «Своя работа», можно ознакомиться на сайте «Биомолекула» (<http://biomolecula.ru/content/1380>), посвященном молекулярным основам современной биологии и практическим применениям научных достижений в медицине и биотехнологии. По договоренности с организаторами конкурса мы публикуем переработанный вариант этой статьи. — *Примеч. ред.*

Членистоногие (насекомые, ракообразные, паукообразные и многоножки) обладают большим разнообразием фоторецепторных механизмов [1]. Самое главное отличие состоит в том, что у них весьма распространены фасеточные (сложные) глаза, состоящие из большого количества омматидиев (простых глазков). Омматидий в первом приближении выглядит как конус, у которого основание представляет собой шестиугольную фасетку (роговичную линзу) на поверхности глаза, а вершина заканчивается нервными отростками в глубине головы (рис.1). Размеры фасетки обычно лежат в пределах от 5 до 50 мкм.

Фасеточные глаза подразделяют на два типа — аппозиционный и суперпозиционный. Пигментные клетки аппозиционного глаза расположены таким образом, чтобы на фоторецепторную часть каждого омматидия не попадал свет от соседних. Простой глаз в такой системе представляет собой длинную узкую трубу с толстыми непроницаемыми стенками и светочувствительными рецепторами на дне, в результате изображения от разных омматидиев не перекрываются. Такая конструкция хорошо работает при высокой освещенности, поэтому ею обладает большая часть дневных насекомых. В суперпозиционном глазе изображения, поступающие от соседних омматидиев, могут суммироваться, что позволяет видеть при меньшей освещенности благодаря увеличению доли проходящего света. Если объединение изображений происходит за счет того, что в ночное время пигмент в клетках перераспределяется, делая стенки прозрачными (при этом из-за выигрыша в светосиле уменьшается разрешение), такой подтип строения глаза называется оптикосуперпозиционным. Такие глаза имеются преимущественно у ночных видов, например мотыльков. Если же изображение от соседних омматидиев поступает из-за небольшого перекрывания их видимой области, а дальнейшая обработка суммарного изображения ложится на нервную систему, то это нейросуперпозиционный тип строения глаза. Такой механизм позволяет, например, мухам хорошо ориентироваться и днем, и в сумерках.

Каковы же основные преимущества и недостатки сложного глаза насекомых по сравнению с человеческим? С одной стороны, разрешение оптической системы насекомых определяется не числом фоторецепторов, а количеством самих омматидиев, так как сигнал каждого преобразуется в отдельный «пиксель». Поэтому человеческий глаз явно лучше — миллионы рецепторных клеток против тысяч простых глазков. С другой стороны, несомненное преимущество фасеточных глаз — их большой угол обзора (почти 360° у отдельных видов), за исключением мертвой точки прямо позади тела (что легко исправляется с помощью глазных стебельков). Кстати, некоторые виды обладают не только парой фасеточных глаз, но и отдельно стоящими простыми глазками, направлен-

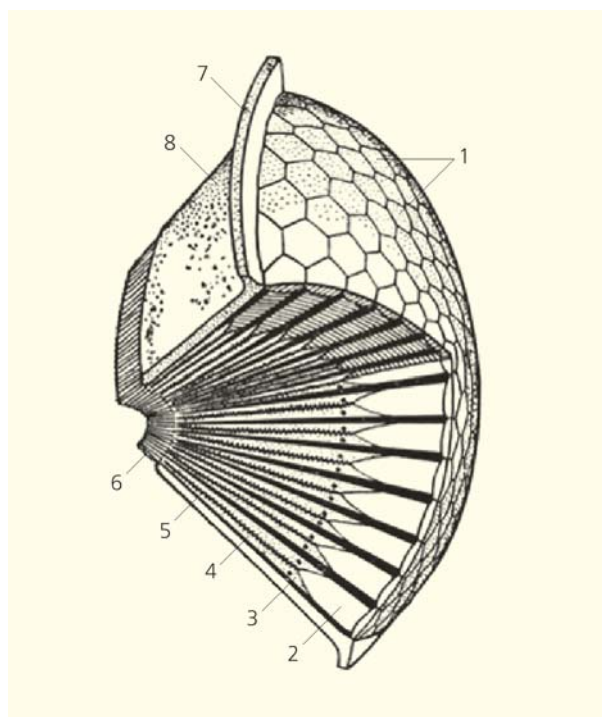


Рис.1. Схема строения фасеточного глаза: роговичные фасетки (1), светопреломляющий аппарат (2), пигментные (3) и зрительные (4) клетки, светочувствительный элемент омматидия (5), аксоны зрительных клеток, идущие в оптические ганглии (6), покровы головы (7), глазная капсула (8).

ными в разные стороны. Такие глаза не способны различать объекты (разрешение составляет всего один «пиксель»), но могут реагировать на смену освещенности. Их обычно бывает три или больше, а располагаются они на голове или на спине. Из всего многообразия мира членистоногих отдельно стоящие простые глазки присутствуют у некоторых жуков, муравьев, ос и стрекоз, а пауки вообще не могут без них обходиться. Естественно, существуют и исключения — например, незрячие насекомые, живущие под землей. Некоторые возможности зрительного аппарата членистоногих поражают воображение. За счет особой конструкции фоторецепторной части многие пчелы могут различать свет с разной поляризацией, что помогает им ориентироваться по солнцу даже в пасмурную погоду. Отдельные виды стрекоз не ограничивают себя только одним типом сложного глаза, поэтому у них верхняя его половина может быть аппозиционной, а нижняя — суперпозиционной. У большинства животных не больше четырех рецепторов (три вида колбочек и один вид палочек), в то время как количество цветовых рецепторов у раков-богомолов достигает 12 (должно быть, у них очень яркая жизнь). С точки зрения функциональных особенностей глаза (а не его внешнего вида) выявляется следующая закономерность: фасеточный глаз приспособ-

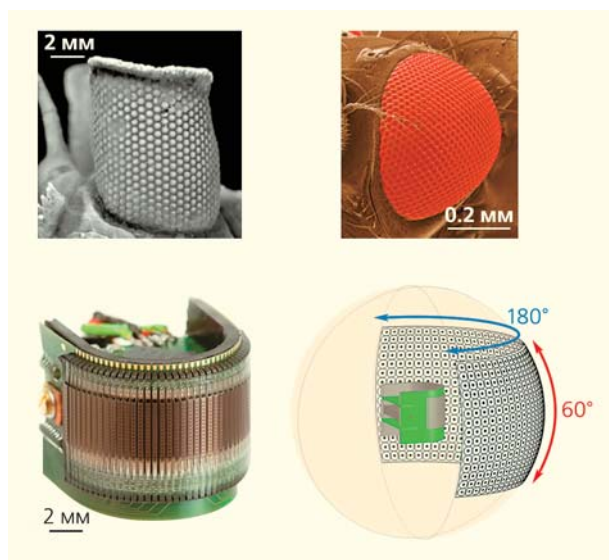


Рис.2. Фасетчатый глаз и его бионический аналог [2]. Вверху — сложные глаза вымершего трилобита *Erbenchile erbeni* (слева; doi:10.1126/science.1088713) и плодовой мушки *Drosophila melanogaster* (doi:10.1126/science.1182228). Внизу изображен прибор CurvACE (Curved Artificial Compound Eye), кандидат на самый маленький искусственный сложный глаз (объем 2.2 см³, масса 1.75 г и потребляемая мощность менее 0.9 Вт), и его схематичное изображение рядом с аналогичным по угловому разрешению фасетчатым глазом.

соблен прежде всего для детектирования движущихся объектов, в то время как человеческий — для распознавания образов. Так, насекомое с трудом может узнать человека в лицо, а просмотр кинофильма покажется ему скучным занятием, потому что сложный глаз может улавливать колебания с частотой до 300 Гц (против приблизительно 50 Гц у человека) и фильм будет просто очень медленной сменой картинок. Эта особенность очень важна для летающих насекомых, так как позволяет лучше ориентироваться в пространстве на больших скоростях (и вовремя избежать удара мухобойкой).

Итак, фасеточный глаз имеет определенные преимущества, и исследователи пытаются поставить их на службу современным технологиям, изобретая разнообразные датчики (рис.2). Практически все вышеперечисленное обнаружили с помощью светового микроскопа на микроуровне. Но не менее интересные открытия ждали ученых на более мелких масштабах.

Нанобугорки

В 60-х годах прошлого века ученые решили рассмотреть поверхность сложного глаза бабочек под электронным микроскопом. Неожиданностью стало то, что поверхность фасетки у некоторых видов могла быть покрыта большим количеством

плотно посаженных нанобугорков (рис.3). В ходе детального анализа выявили физические особенности такого покрытия, а методом атомно-силовой микроскопии уточнили размеры наноструктур — 200—400 нм в ширину и 10—250 нм в высоту [3, 4]. Оказалось, что наноструктурированная поверхность фасетки обладает антиотражательной функцией — похожий прием человек использует для создания просветляющего оптического покрытия у фотоаппаратов. Наноструктуры фасеток, с одной стороны, снижают заметность насекомого благодаря уменьшению блеска глаз, а с другой стороны, позволяют ему лучше видеть за счет увеличения доли проходящего света. Эти исследования проводились на насекомых, пойманных в живой природе. Следующим шагом стало изучение модельного организма — плодовой мушки *Drosophila melanogaster*.

В нашем коллективе Пущинского научного центра РАН ре-

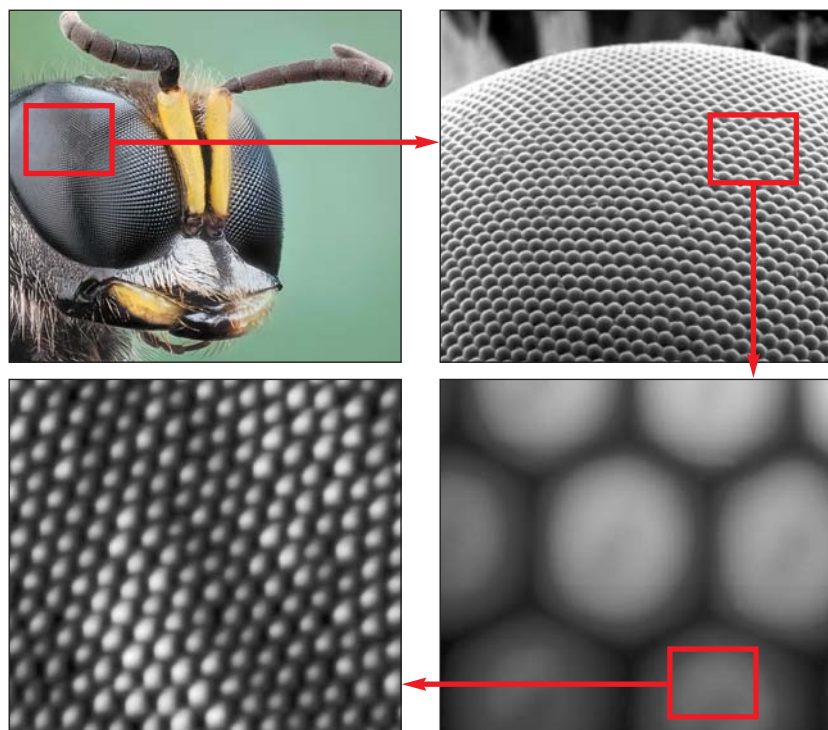


Рис.3. Устройство сложного глаза насекомого. Последовательно изображены голова осы, глаз насекомого, роговичные линзы омматидиев (фасетки) и нанобугорки на их поверхности.

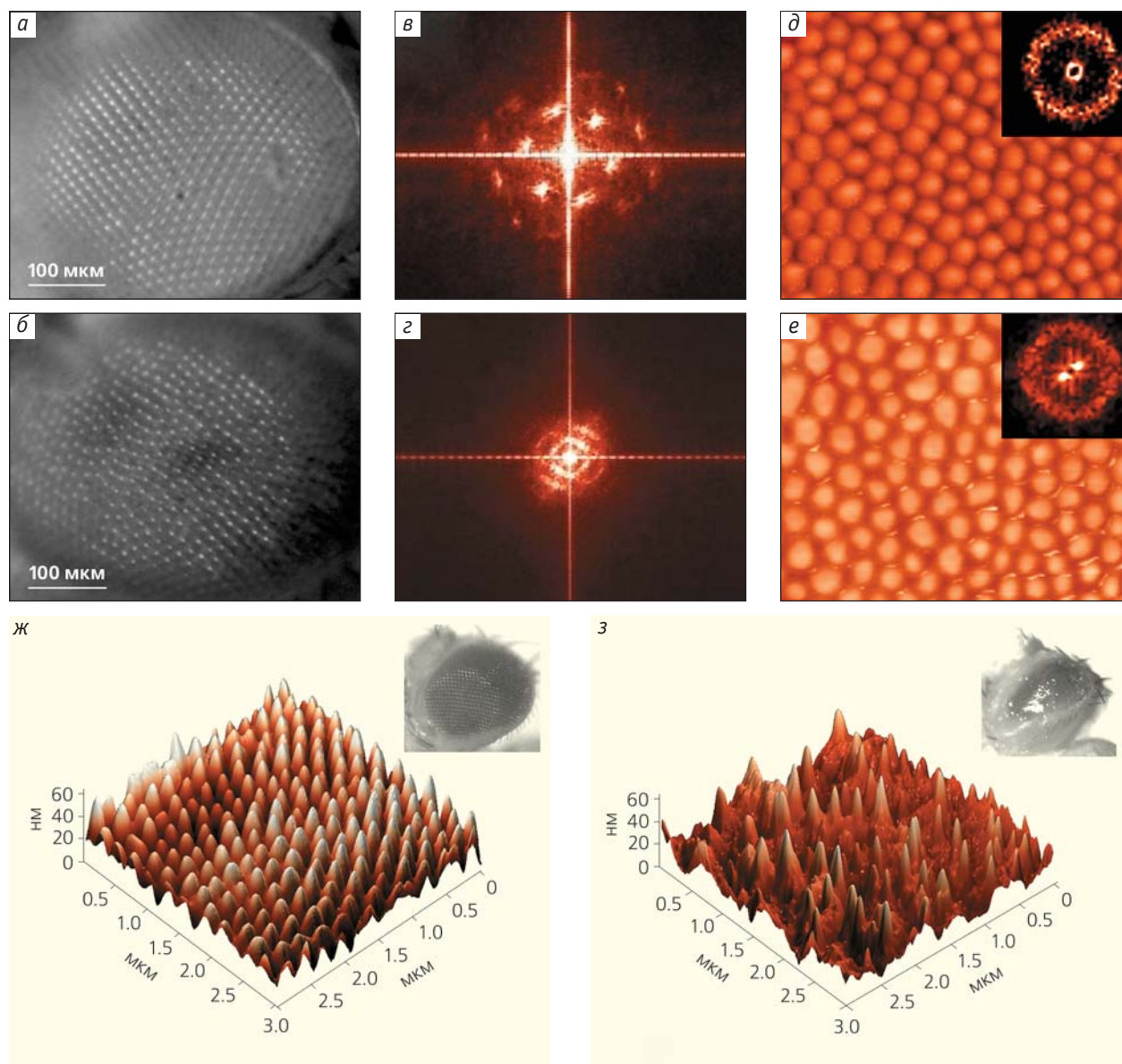


Рис.4. Наноструктура глаз дикого и мутантных типов *Drosophila melanogaster* [5]. Сложный глаз дикого типа дрозофилы (а) характеризуется строгой гексагональной упаковкой омматидиев, в то время как у мутанта *Frizzled* (б) наблюдается фенотип «рыхлый глаз» с нарушенным расположением простых глазков. Это подтверждается при анализе дифракционной картины и фурье-преобразования изображений глаз дикого типа (в), где наличие шестиугольника говорит о гексагональной упаковке, и мутанта *Frizzled* (з), для которого наблюдается размытое кольцо, указывающее на случайное распределение фасеток. Нанобугорки на омматидиях распределяются в обоих случаях (д, е) хаотично. Сравнение глаз дикого типа *D. melanogaster* (ж) и мутанта *Glazed* (з) показывает, что данная мутация достаточно сильно влияет как на микро-, так и на наноструктуру глаза. Помимо нарушения упаковки самих омматидиев нанобугорки также претерпевают значительные изменения и уменьшаются в размерах. Как следствие, глаза плодовой мушки начинают давать больше бликов из-за нарушения антиотражательного слоя.

шено было применить методы молекулярной биологии и вмешаться в развитие поверхностной структуры глаза (рис.4) [5]. Мы проанализировали степень упорядоченности микро- и наноструктур на поверхности глаза дрозофилы, а также подтвердили изменение антиотражательных свойств с помощью искусственного вмешательства в гене-

тическую информацию. Поверхность глаз двух мутантов дрозофилы исследовали в микро- и наномасштабах. Мутации затрагивали разные компоненты сигнального пути Wnt-Frizzled, отвечающего за передачу информации между клетками и, в частности, играющего значимую роль в эмбриональном развитии всех многоклеточных организ-

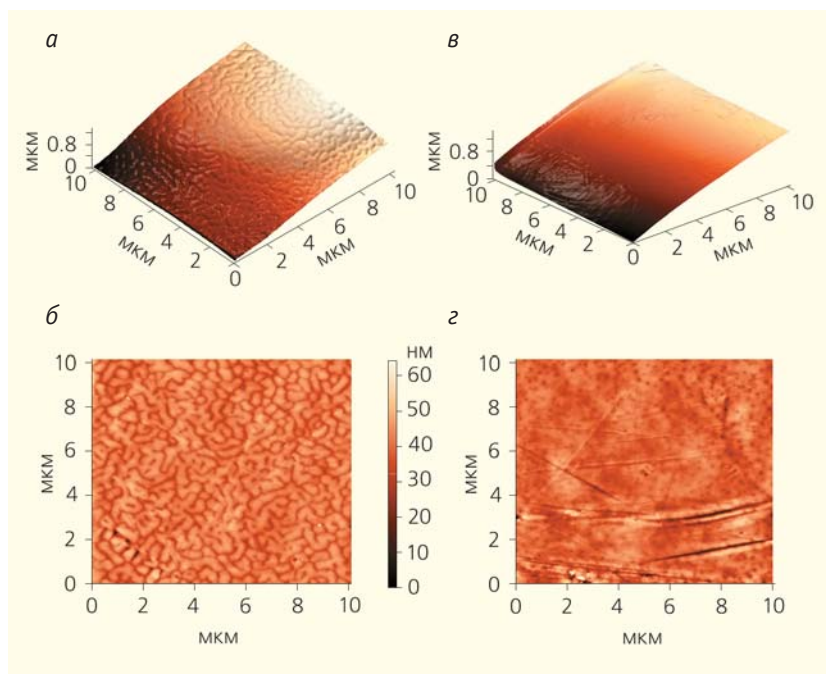


Рис.5. Изображение надводной (а, б) и подводной (в, г) частей глаза жука-вертячки (атомно-силовая микроскопия) [6] в трехмерном (вверху) и двумерном виде (приведены фрагменты размером 10х10 мкм). Видна ярко выраженная лабиринтообразная наноструктура на надводной части глаза и гладкая на подводной. Цветовая шкала характеризует высоту нанобугорков.

мов. У первого мутанта, *Frizzled*, нарушилась упорядоченность упаковки омматидиев в сложном глазу, однако нанобугорки на поверхности отдельных простых глазков не были затронуты. У второго мутанта, *Glazed*, обнаружилась значительная деградация нанобугорков на поверхности омматидиев. Именно для него ранее был описан

«эффект лотоса» — ярко выраженная гидрофобность поверхности. Еще с 70-х годов XX в. известно, что расположенные с определенной периодичностью бугорки очень маленьких размеров могут мешать каплям смачивать поверхность из-за силы поверхностного натяжения. Интересно было проверить верхнюю и нижнюю части глаза на на-

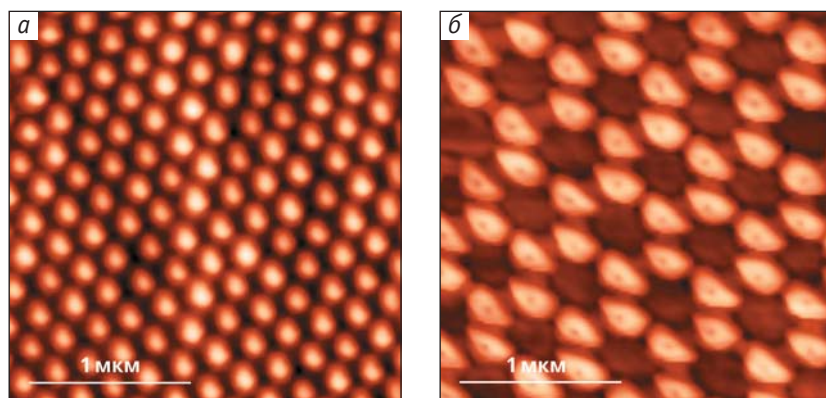


Рис.6. Наноструктуры глаз ночных бабочек и ногохвостки. У ночных бабочек (а) глаза обладают самыми высокими антибликовыми свойствами среди насекомых, что достигается за счет строгой упорядоченности нанобугорков и их большой высоты — 200 нм. Специфические наноструктуры на поверхности глаз ногохвостки (б) обеспечивают гидрофобность, благодаря чему вода не попадает в глаза насекомому.

так называемый фенотип «зеркального глаза», поверхность которого отражает намного больше света, чем в норме. Это подтверждает связь между наличием на омматидиях структур в виде нанобугорков и антиотражательным эффектом поверхности глаза.

Кроме плодовой мушки был исследован еще один любопытный объект — жук-вертячка, хищный обитатель пресных водоемов, плавающий частично погруженным в воду. Его глаза разделены на надводную и подводную половины. Свойства нанопокрывтий роговичных линз этого жука, совмещающего в своей жизни такие разные среды обитания, до этого никто не проверял. Различаются ли покрытия глаз одного и того же насекомого, находящегося в различных физических условиях? Также вызвала интерес возможная функциональная привязка этих нанопокрывтий — за что именно отвечает данная особенность строения. Среди возможных функций мог быть

«эффект лотоса» — ярко выраженная гидрофобность поверхности. Еще с 70-х годов XX в. известно, что расположенные с определенной периодичностью бугорки очень маленьких размеров могут мешать каплям смачивать поверхность из-за силы поверхностного натяжения. Интересно было проверить верхнюю и нижнюю части глаза на наличие антиотражательного эффекта, описанного для бабочек и дрозофилы. Оказалось, что половинки глаз жука-вертячки действительно различаются. Омматидии нижнего, подводного, глаза полностью гладкие, а поверхность омматидиев верхнего, надводного, покрыта уже не нанобугорками, а лабиринтообразной структурой схожих размеров (рис.5) [6]. В ходе экспериментов выяснилось, что гидрофобные свойства верхней и нижней половинок сопоставимы, а антиотражательные отличаются почти вдвое — верхняя часть с выраженной наноструктурой отражает меньше света, чем нижняя. Также мы выявили зависимость доли отражения падающего света от длины волны.

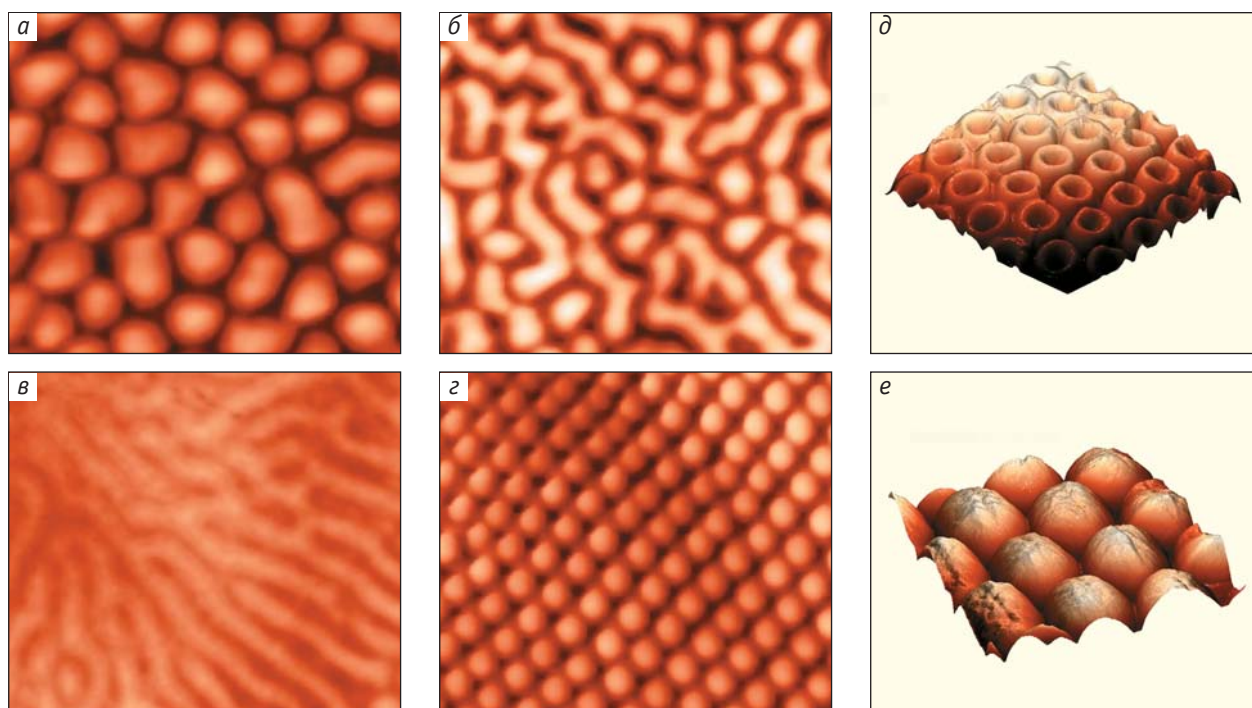


Рис.7. Нано- и микроструктуры глаз насекомых. Наноструктуры глаз могут заметно различаться у разных видов насекомых, например, мух (а, б), клопов (в) и мотыльков (з). Какой эффект достигается за счет такой геометрии поверхности в каждом случае — неизвестно. Несмотря на большое разнообразие наноструктур, микроструктура глаз обычно сходна у всех видов. Однако есть и исключения, например, у бабочек (д) фасетки могут сильно отличаться от обычных (е).

Анализ большого количества разных видов насекомых показал, что внешне наноструктуры на поверхности глаз могут значительно различаться (рис.6, 7, а–з). Встречаются не только нанобугорки, но и лабиринтообразные, и сильно вытянутые структуры, а также более сложные образования (как у ногохвостки). Таким образом, мир наноструктур у насекомых представлен гораздо большим разнообразием по сравнению с микроструктурой (см. рис.7, д–е).

Итак, физические свойства нанопокровов зависят от геометрии поверхности. Применение их антибликовых и грязеотталкивающих функций уже достаточно широко распространено. Учитывая большое разнообразие природных объектов, ученые продолжают изучать и использовать их свойства в практических целях (например, для создания гидрофобных покрытий экрана смартфонов или антиотражательных поверхностей ячеек солнечных батарей). ■

Литература

1. Руководство по физиологии органов чувств насекомых / Под ред. Г.А.Мазохина-Поршнякова. М., 1983.
2. Floreano D., Pericet-Camara R., Viollet S. et al. Miniature curved artificial compound eyes // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2013. V.110. P.9267–9272. doi:10.1073/pnas.1219068110
3. Bernhard C.G., Miller W.H. A corneal nipple pattern in insect compound eyes // Acta Physiol. Scand. 1962. V.56. P.385–386.
4. Stavenga D.G., Foletti S., Palasantzas G. et al. Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies // Proc. Biol. Sci. 2006. V.273. P.661–667. doi:10.1098/rspb.2005.33695
5. Kryuchkov M., Katanaev V.L., Enin G.A. et al. Analysis of micro- and nano-structures of the corneal surface of *Drosophila* and its mutants by atomic force microscopy and optical diffraction // PloS One. 2011. V.6. e22237. doi:10.1371/journal.pone.0022237
6. Blagodatski A., Kryuchkov M., Sergeev A. et al. Under- and over-water halves of *Gyrinidae* beetle eyes harbor different corneal nanocoatings providing adaptation to the water and air environments // Sci. Rep. 2014. V.4. P.6004. doi:10.1038/srep06004

Кочевой мир Евразии: номады Запада на заре эпохи металлов

Е.Н.Черных

Продолжая рассказ о культуре кочевых племен Евразии, начатый в предыдущей статье*, обратимся к протяженной и непростой истории наиболее ранних в этом ряду общностей — номадов Запада.

В 5-м тысячелетии до н.э. в Евразии зародилось горно-металлургическое производство. С его появлением закончилась длительная — примерно в четыре тысячелетия — но пространственно весьма ограниченная эпоха протометалла [1] и прозвучал старт новой эпохи — раннего металла. Она подразделялась на четыре основные технологические фазы или стадии развития, именуемые в археологии веками: медный и три бронзовых — ранний, средний и поздний. Фазы эти уложились в четыре тысячелетия до новой эры — от пятого до второго [1, 2]. В 1-м тысячелетии до н.э. на смену эпохе раннего металла пришла эпоха раннего железа [1].

Бросалась в глаза достаточно очевидная сопряженность каждой из технологических стадий эпохи раннего металла со «своим» тысячелетием, т.е. медный век — с пятым, ранний бронзовый век — с четвертым и так далее до железного века. Как при-



Евгений Николаевич Черных, доктор исторических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заведующий лабораторией естественнонаучных методов Института археологии РАН. Область научных интересов — история технологий и структура древних культур и общностей Евразии.

вило, старт каждой из таких тысячелетних стадий знаменовался, во-первых, своеобразным «взрывом» или же стремительным появлением блока инноваций в технологии горного дела, металлургии и металлообработки. Взрыв — если он не относился к разряду точечных — практически всегда влек за собой территориальный скачок заметного расширения ареала металлоносных культур. В свою очередь пространственный рывок непременно инициировал резкие перемены на этнокультурном полотне евразийских пространств. Во-вторых, практически всегда за каждым из такого рода пространственно-технологических рывков наступал уже иной, «спокойный» период пространственно-технологической же стабилизации. В такие периоды технологические и этнокультурные полотна в Евразии словно застыли в относительной неподвижности, а изменения неких деталей в подобного рода картинах казались малозначимыми, либо даже в основных категориях производства наблюдалась технологическая и морфологическая стагнация. Вместе с тем каждый последовательный шаг технологического прогресса отличался от предшествующего весьма разнообразными особенностями: взлеты чередовались с провалами или же трудно понимаемыми трансформациями культур. Подобного рода плохо объяснимые «зигзаги и извивы» в развитии пастушеских сообществ Запада нередко формировали перед исследователем запутанные клубки крайне сложных и взаимосвязанных вопросов.

* Черных Е.Н. Кочевой мир Евразии: структура и динамика развития // Природа. 2014. №9. С.48—59.

Металлургическая революция пятого тысячелетия

Наиболее ярким символом исходного шага в развитии культур западных кочевников стала, безусловно, металлургическая революция. Именно поэтому с упоминания данного события археологи нередко начинают описания древнейших общностей медного века в Евразии*.

Колыбель металлургической революции находилась на севере Балканского п-ова и в Карпатах, что совпадает с бассейном Среднего и Нижнего Подунавья. Взрыв инноваций произошел в большом отдалении от «сакральной» земли месопотамского Двуречья, откуда, как еще недавно считали многие, изливался благостный «свет» на «диких варваров» севера. Довольно далекой от колыбели оказалась также и Восточная Анатолия, где вспыхивали древнейшие в Евразии очень яркие, хотя и точечные технологические взрывы эпохи протометалла в 9–7-м тысячелетиях до н.э. [2]. Знаковыми памятниками революции стали медный рудник Аи бунар в южной Болгарии и особо привлекательный для различных экспозиций знаменитый Варненский некрополь со множеством медных изделий и тремя тысячами золотых украшений. Тогда же — в 5-м тысячелетии до н.э. — сформировалась первая в евразийской истории Балкано-Карпатская металлургическая провинция (БКМП), где на площади до 1,5 млн км² — от Балкан до Поволжья — распространялась медь, выплавленная из руд балкано-карпатских месторождений. С этими рудными источниками был связан основной блок культур провинции, где выплавлялась вся медь, из которой изготовлялась основная масса орудий и оружия. Технология искусственных сплавов на медной основе (бронз) здесь была неизвестна.

Пастушеских общностей, занимавших в основном области крайнего западного фланга Степного пояса — от устья Дуная вплоть до Среднего и Нижнего Поволжья, металлургическая революция коснулась, судя по всему, лишь косвенно. В ряде погребений из малопродуктивных некрополей этих культур находят много мелких медных украшений, но метал-

* Подробнее о месте и времени зарождения металлургической революции можно прочитать в предыдущих статьях в «Природе» (2008. №3. С.34–43; 2011. №7. С.3–13). Здесь же ограничусь краткими повторами некоторых ранее высказанных положений, без которых читателю трудно будет проследить путь развития интересующих нас народов.



Варненский некрополь: погребение вождя в одной из могил.

лические орудия или оружие встречаются крайне редко. Металл из основных горно-металлургических центров БКМП проделывал двух- и даже трехтысячекилометровый путь на восток и северо-восток, чтобы в конечном итоге занять свое место в могильном инвентаре погребений местных пастухов.



Ареал Балкано-Карпатской металлургической провинции. Цифрами показаны центральная (1) и периферийная (2) группы оседло-земледельческих культур, а также степные скотоводческие общности (3); желтые точки обозначают пути миграций скотоводов за пределы их домена.

С ярким технологическим взрывом, повлекшим за собой формирование и активизацию БКМП, оказались сопряженными и, кажется, взаимосвязанными два труднообъяснимых события. Во-первых, горно-металлургическое производство в самой провинции, хотя и существует около тысячи лет, угасает довольно быстро и неожиданно. Стартуя словно с «нуля», вся технология, как и выработанные в основных центрах провинции морфологические стандарты продукции, также уходят в «нуль», быстро исчезая и не обнаруживая следов за собой каких-либо очевидных продолжений. «Растворение» во времени и пространстве точечных технологических взрывов предшествующей эпохи протометалла [2] сходного удивления не вызывало. Взрывы, как правило, охватывали в ту древнейшую эпоху малое (точечное) пространство. И отражалось это чаще всего на материалах отдельных поселений или святилищ, а их влияние не касалось широких территорий. Территория же БКМП была несопоставимо обширнее.

Во-вторых, после распада провинции практически на всех занятых культурами скотоводов и втянутых в систему провинции областях вообще исчезают какие-либо археологические памятники. Данный поразительный по своей крайней редкости феномен отчасти можно проследить даже за пределами пастушеских общностей, например в прилегающих к Черному морю с запада регионах, в областях господства оседло-земледельческих культур. Массовые серии радиоуглеродных датировок говорят об отсутствии археологических материалов в течение нескольких сотен (и даже до тысячи) лет. Лишь с началом 3-го тысячелетия до н.э. здесь появляются крупные блоки так называемых курганных культур. Однако они будут относиться уже к следующему этапу развития общностей кочевников евразийского Запада.

Удивляющий нас хронологический «провал» можно попытаться объяснить двояко. Возможно, имело место полное и длительное исчезновение населения из обширного региона в несколько сотен тысяч квадратных километров. Либо же в системе идеологических установок в среде западных кочевников произошли в 4-м тысячелетии до н.э. кардинальные перемены, которые и стали причиной полного отказа от основных форм господствовавшего ранее погребального обряда. Первый вариант объяснений кажется чрезвычайно сомнительным: представить полностью опустевшей и по существу абсолютно «бесхозной» огромную и удобную для обитания территорию невозможно — такие случаи в истории вряд ли найдутся. Второй вариант более приемлем: нам достаточно хорошо известны случаи идеологических трансформаций с последующим их отражением в погребальных обрядах. В предыдущей статье говорилось о двух полярных системах в представлении культур о земном и внеземном мирах и об обусловленных этим ритуалах при переселении

покойных из мира земного в мир потусторонний [3]. Во всяком случае имеет смысл вспомнить об этом весьма загадочном вопросе еще раз, но уже в заключительной части предлагаемого читателю цикла статей, когда на первый план выйдут культуры кочевников евразийского Востока, у которых понимание о полной асимметричности земного и внеземного миров в большинстве случаев определенно доминировало.

У истоков Циркумпонтийской провинции

Вторая фаза датируется 4-м тысячелетием до н.э. и в соответствии с общей периодизацией эпохи раннего металла Евразии соответствует раннему бронзовому веку. Наиболее ярким событием этого тысячелетия стало, без сомнения, формирование Циркумпонтийской металлургической провинции (ЦМП), занявшей вскоре центральное положение среди прочих социотехнологических систем континента. Наименование провинции было обусловлено тем, что в следующем — третьем — тысячелетии ее производственные очаги уже полностью, со всех сторон, окружали обширные пространства вокруг Черного моря (или же *Понта Эвксинского*, в согласии с древнегреческими географическими терминами). В развитии ЦМП четко различаются две последовательные фазы, и ранняя (4-е тысячелетие до н.э.) носит название Прото-Циркумпонтийской. Префикс «Прото» связан с тем, что первоначальной областью технологических инноваций стали восточная и центральная Анатолия, бассейны Тигра и Евфрата, северный Левант, а также южный Кавказ. Тогда, на ранней стадии, к *Понту* производственные центры провинции подступали лишь с юго-востока и востока.

Структура Прото-ЦМП по ряду важных деталей напоминала ту, что отмечалась еще для Балкано-Карпатской провинции: в ней также различались два блока культур. Южные оседло-земледельческие общности определяли в рамках системы, безусловно, основную и самую обширную группу. Их памятники заполнили практически весь ареал древнейшей евразийской эпохи протометалла, датированной в широких пределах 9/8—5-м тысячелетиями до н.э. Помимо того, в 4-м тысячелетии до н.э. в ареал бывшей зоны оседло-земледельческих культур протометалла оказался втянутым также южный Кавказ. Общая площадь культур южного блока достигла в тот период приблизительно 1.3—1.5 млн км². Сырьевой базой для горно-металлургического производства в южной зоне послужили богатейшие и разнообразнейшие месторождения меди, а также иных полезных ископаемых — мышьяка, сурьмы, серебра, золота, рассредоточенных по горным областям Анатолии, южного Кавказа и западного Ирана. Северные скотоводческие культуры в границах ЦМП господствовали на пространствах к северу от Большого Кавказа, пре-

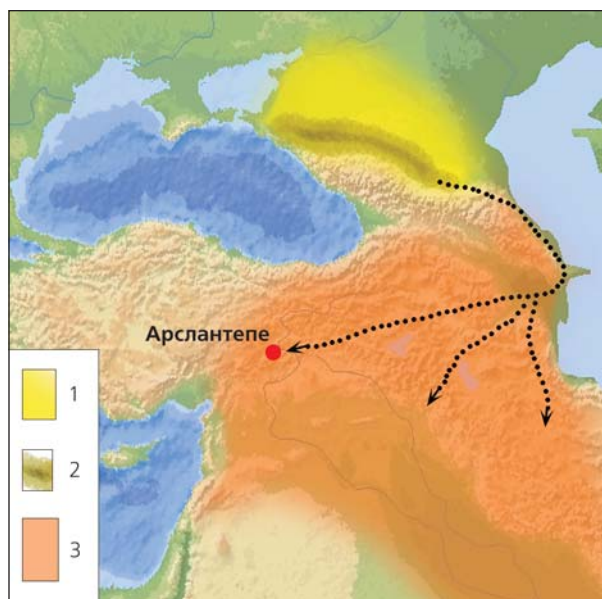
имущественно в бассейнах Кубани, верховьях Терека, доходя до низовьев Дона. Общая площадь их территории на фоне южных оседлых земледельцев была сравнительно небольшой — примерно 300—350 тыс. км².

Уже начальные шаги Прото-ЦМП, связанные с активизацией ее производственных центров, выявили весьма примечательную картину совершенного несходства и, пожалуй, даже резкого контраста с более ранней БКМП фактически по всем их важнейшим проявлениям. Разной оказалась и судьба горно-металлургического производства. Как морфология продукции, так и технология металлургического производства в рамках Прото-ЦМП едва ли не принципиально отличались от стандартов предшествующей по хронологии БКМП. Здесь доминировал сплав меди с мышьяком (мышьяковые бронзы), а несколько тысяч золотых и серебряных изделий относились к разряду высокохудожественных образцов ритуальных предметов и украшений. Зарождение и выработку стандартов металлургии Прото-ЦМП следует считать вполне самобытными.

Прото-ЦМП: Кавказ как мост между Югом и Севером

Общины северных скотоводов пользовались исключительно импортным металлом — производным южных центров. И в этом также как будто напрашивается параллель с картиной ранней БКМП, где восточные и северо-восточные пастушеские сообщества полностью зависели от источников металла головного блока культур провинции. Однако структурное сходство обеих провинций в то же время ярко высветило воистину полярные различия в характере и проявлениях материальной культуры, а также в идеологических постулатах сопоставляемых здесь евразийских систем.

Особую, пожалуй, даже коронную роль в северном блоке играла *майкопская* культура, или же общность, при том что ее площадь была совсем незначительной — вряд ли более 75—80 тыс. км², т.е. не более четверти от общего охвата скотоводческих культур Прото-ЦМП. Ее памятники располагались в основном в бассейнах Кубани и верхнего Терека. Отличительный признак погребальных памятников майкопской культуры — это, конечно же, огромные надмогильные курганные насыпи, перекрывавшие погребения местных вождей и знати. То были первые и ясные признаки *да-*

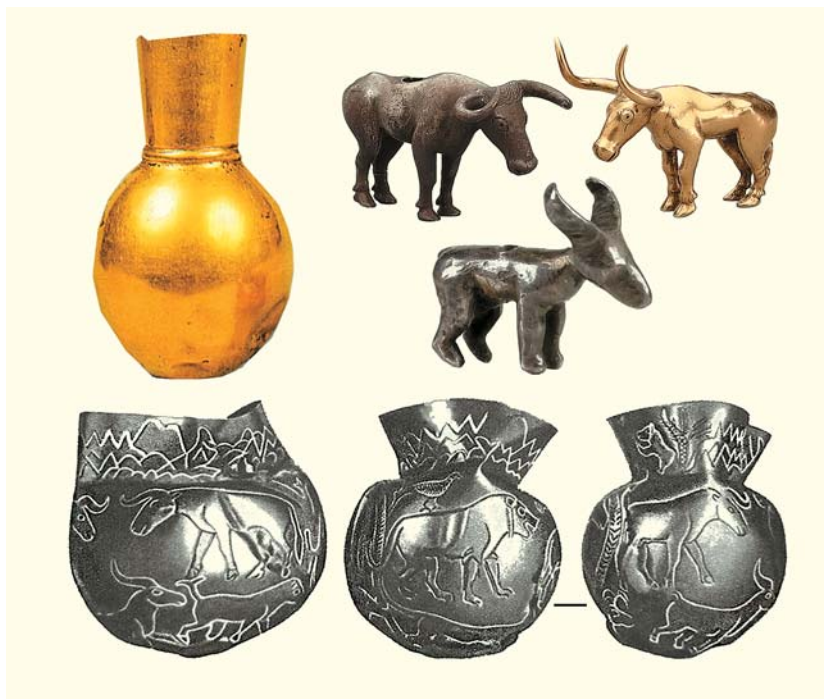


Такими представляются наиболее вероятные пути конных скотоводов «майкопа» на юг, в ареал домена оседло-земледельческих культур Прото-Циркумпонтийской металлургической провинции и к Арслантепе. Условные обозначения ареалов: 1 — степных курганных культур 4-го тысячелетия до н.э., 2 — майкопской культуры с богатыми подкурганными захоронениями вождей, 3 — оседло-земледельческих культур. Пунктирными стрелками показаны вероятные пути перемещения майкопских конных групп на юг.

ров кочевников евразийской истории, проявившие себя в изначальной форме привычного для нас термина *мавзолей*. Более ранние и столь очевидные свидетельства возвеличивания и героизации образа племенных вождей в Евразии археологам неизвестны, и об этом говорилось в предыдущей статье [3].



Примерно так выглядели наиболее крупные курганы майкопской общности (на фото изображен курган более позднего времени).



Курган с погребением вождя в г. Майкопе. Золотые и серебряные фигурки быков и осла, а также сосуды.

В подкурганых элитных могилах, представляющих собой каменные ящики, окруженных к тому же кольцевыми каменными выкладками, была сосредоточена огромная масса различного металла: бронзовое оружие, золотые и серебряные украшения и предметы сакрального характера. Оказалось, что в погребальных сооружениях элиты майкопской культуры сосредоточено более 99% (!)

металлических изделий, в то время как лишь немногим более 500 происходило из памятников зоны южной. Контраст с особой выразительностью проявил себя на драгоценных металлах: на юге суммарно удалось отметить не более 50—60 (!) изделий из золота и серебра. И только бронзовых предметов на юге было несколько больше — правда, всего лишь на сотню (примерно 500). В подмеченной здесь удивительно странной и даже маловероятной пропорции металлов оказалась скрытой чрезвычайно любопытная загадка. Источники практически всех металлов, равно как и все свидетельства металлопроизводства и металлообработки, сосредоточены южнее Большого Кавказа, а к северу от него ничего похожего на подобное производство мы не знаем.



Курганы элиты майкопской общности. Бронзовые топоры, наконечники копий, ножи-кинжалы и свернутые в спираль прутки — предполагаемые детали конской упряжи.

всего известного в ее памятниках металла. Из примерно 9 тыс. зафиксированных в комплексах майкопской культуры металлических предметов около 7.5 тыс. были золотые, более 1100 — серебряные и только примерно 400 — бронзовые. Правда, если ориентироваться на вес металлов, то первенство принадлежало бы, конечно, бронзе — ведь именно из этого сплава меди с мышьяком и отливалось сосредоточенное в захоронениях самое массивное и крупное оружие. Золотые же украшения здесь, как правило, крупными размерами не отличались и весили немного.

Другим, по всей видимости, еще более примечательным и, пожалуй, непредвиденным сюрпризом в системе Прото-ЦМП стало соотношение всех известных нам металлов по ареалам двух основных структурных зон. В северной зоне археологи зафиксировали примерно 9 тыс.

Напрашиваются два варианта объяснения. Первое: это возможный результат торгового обмена между северными скотоводами и южными народами. Второе: перед нами трофеи, захваченные в результате победоносных военных набегов кочевников, либо это дань победителям.

Торговый обмен кажется совершенно малореальным. Что могли предложить Nomads

южанам? Разумеется, скот. Стада северокавказских скотоводов должны были в таком случае проделать поразительно долгий — в несколько сотен, а может даже и более одной-двух тысяч километров — трудный путь, да еще по чужой территории, огибая Большой Кавказ с востока. Во что превращался бы мелкий и крупный рогатый скот после таких перегонов? Кроме всего, возможен ли был в принципе свободный и равноценный торговый обмен обычного скота на драгоценный металл безусловно княжеского ранга?

Несравненно более аргументированной представляется вторая версия: редкие по форме и значимости металлические драгоценности в могилах степных лидеров майкопской культуры суть победные военные трофеи либо скорбная дань побежденных. Правда, подобный успех кажется возможным лишь в случае обладания скотоводами оседланной лошади и формирования уже в 4-м тысячелетии до н.э. кавалерийских отрядов. Прямых доказательств, к сожалению, нет, потому обратимся к косвенным, каковых немного. В погребениях майкопской общности нет останков прирученной лошади. Встречаются лишь закрученные в спираль бронзовые прутки, в которых многие археологи видят деталь конской узды. Можно при этом сослаться на весьма отдаленную и в пространственном, и в хронологическом отношении параллель: знаменитые и хрестоматийно известные в Евразии всадники гунны (хунну) фактически никогда не сопровождали покойника лошадьми; лишь детали узды могли косвенно подтвердить причастность погребенного к разряду всадников.

На мой взгляд, гораздо более существенным, хотя опять-таки косвенным признаком всадничества майкопских племен были их тысячекilометровые рейды за Большой Кавказ, в Анатолию, вплоть до верховьев Тигра и Евфрата. Скотоводы без конной базы не могли бы похвастать такими подвигами. И наиболее ярким подкреплением этой гипотезы стали материалы многолетних и весьма результативных раскопок на жилищном холме Арслантепе, расположенном в самых верховьях бассейна Евфрата [4].

Сам жилой холм невелик (примерно 5—6 га), однако мощность его культурных слоев (около 30 м) впечатляет. По этой причине холм Арслантепе напоминает по форме гигантский курган, что, по всей вероятности, отразилось на истории и судьбе его обитателей. Во второй половине 4-го тысячелетия

здесь располагался центр некой, возможно даже немалой округи, что следует из явных следов глинобитных дворца и храма. На стенах дворца сохранилась к тому же цветная роспись. Но в какой-то момент и храм, и дворец были полностью разрушены незваными пришельцами, в которых трудно было угадать северных «гостей». Результатами «визита» стали обедненные архитектуры поселка и — пожалуй, в качестве главной новости — сооружение рядом с вершиной холма «Царской могилы».

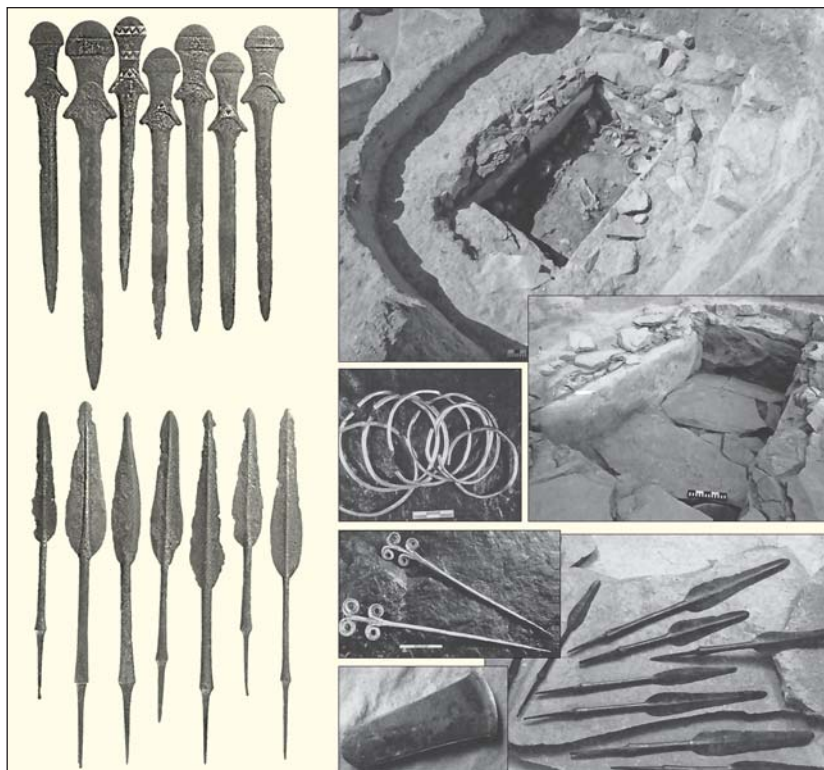
Если бы это «царское» погребение было раскопано на Северном Кавказе, археологи вряд ли отличили бы его там от ряда княжеских, майкопских. Каменный ящик из поставленных вертикально плит, перекрытый также каменными плитами определял в «Царской могиле» основную погребальную камеру. В ней находились плохо сохранившиеся останки мужчины среднего возраста. Поверх камеры лежали останки еще четырех, в основном молодых, насильственно умерщвленных людей разного пола и возраста. Вполне очевидно, что эти персоны должны были «сопровождать» шефа в его последнем походе. В основной камере обнаружили довольно много металла: по преимуществу то было бронзовое оружие и орудия, а также серебряные украшения и немного золота. В целом «визитная карточка» северных воинственных пришельцев выглядела достаточно убедительно, а столь похожий на грандиозный курган жилой холм Арслантепе оказался вполне пригодным для погребения здесь вождя кочевников с соблюдением очень близкого к традиционному похоронного обряда.

Еще об одном любопытном объекте на Арслантепе стоит упомянуть особо. Во время штурма жи-



Жилой холм Арслантепе в восточной Анатолии.

www.google.com/earth



Арслантепе. Слева — бронзовые мечи-кинжалы и наконечники копий из так называемого оружейного зала, справа — погребальная камера «Царской могилы» и инвентарь (бронзовые изделия и серебряные кольца) из захоронения вождя.

лого холма многое было разгромлено. Рухнула, например, глинобитная стена одного помещения, входившего в центральный дворцово-храмовый комплекс, где хранился своеобразный арсенал весьма дорогого бронзового, с серебряными инкрустациями, оружия. Любопытно, что победители о находящемся там великолепном арсенале ничего не знали, иначе они унесли бы оружие с собой и археологи его бы не обнаружили. Не ведали о нем и те побежденные, что остались в живых после победы северян, в противном случае они бы его раскопали и преподнесли властям, а мы бы остались в полном неведении об этой коллекции мечей и копий. Если мы правы в реконструкции маршрута конкистадоров-номадов, то его протяженность вряд ли была менее 2 тыс. км. Это служит, на мой взгляд, одним из самых решающих (пусть даже косвенных) аргументов в пользу мобильного, всаднического характера северокавказских скотоводов. Пешим отрядам такие подвиги вряд ли были бы под силу.

Наконец, еще один коварный вопрос, возникающий в результате изложенных выше материалов и сюжетов. Так что же — номады увезли на север все золото и серебро, а на юге остались только жалкие крохи? Разумеется, нет. Вопрос может быть разрешен через призму контраста в базовых идеологических установках тех миров, что скрестили

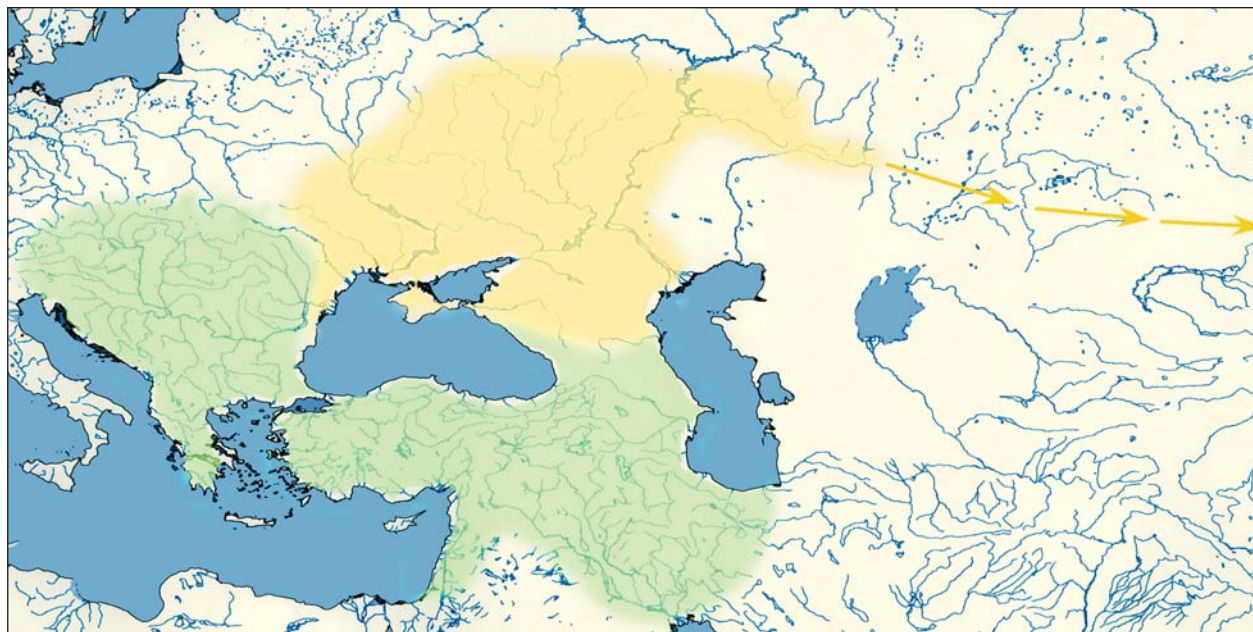
в странном симбиозе свои силы. Для северных номадов и их вождей чрезвычайную важность представляла как необходимость, так и возможность явиться во внеземном — симметричном земному — мире в полном блеске героических атрибутов, сотворенных из золота, серебра, бронзы. Они и преуспели в этом. Для культур оседлых земледельцев юга эта идеология была пока что совершенно чуждой. Все золото должно было служить им только в земном мире. Но вот истечет не столь уж длительный срок, и враждебные для них идеологические максимы превратятся в привычные. И будет это связано уже с третьей фазой развития общностей ЦМП.

Сложение ЦМП в третьем тысячелетии

На основании большой серии радиоуглеродных дат эта фаза датируется 3-м тысячелетием до н.э. и, согласно общей периодизации эпохи раннего металла, определяет средний бронзовый век Евразии. Наиболее ярким событием этого периода стал, безусловно, завершающий этап формирования ЦМП. Уже в начале 3-го тысячелетия провинция приобретает очертания воистину реальной — Циркумпонтийской, ведь именно тогда горно-металлургические и металлообрабатывающие центры этой гигантской системы завершают охват *Понта Эвксинского* со всех сторон.

Исходной базой ЦМП, без сомнения, были ранние наработки производственных очагов Прото-ЦМП. Заключение это исходит из отчетливо выраженного сходства стержневых методов не только в технологии производства и обработки металлов, но и в морфологии наиболее значимых категорий бронзовых изделий, в первую очередь оружия и орудий. Очевиден факт наследия фазы «Прото» хронологически следующим за ней этапом провинции. Это говорит нам о коренном отличии Прото-ЦМП от более ранней БКМП: тогда производственные методы и технические достижения буквально «растаяли» как во времени, так и в пространстве, не оставив после себя сколь-нибудь явно выраженных последствий.

В металлургических и металлообрабатывающих центрах ЦМП не только сохранились основные производственные приемы предшествующего этапа, но и происходило развитие ряда технологических приемов и морфологии продукции,



Циркумпонтийская металлургическая провинция, средний бронзовый век, 3-е тысячелетие до н.э. Зеленым цветом показан южный домен оседло-земледельческих культур, желтым — северный домен скотоводческих культур, желтыми стрелками — вероятный путь западных номадов к Джунгарским воротам и Синьцзяну.

хотя подобного рода инновации принципиальной роли здесь как будто не играли. Пожалуй, наиболее выпукло новшества проявили себя в разработке великого числа разновидностей бронзовых украшений, которые в комплексах стадии «Прото» не привлекали особого внимания ни своим разнообразием, ни значительным числом изделий. Кроме того, существенную роль на данной фазе стали играть сплавы меди с оловом, т.е. по сути уже классические бронзы.

Таковыми, если выразиться предельно кратко, видятся узловые детали, позволяющие надежно увязывать ЦМП с предшествующей системой производственных центров. Добавим к перечисленным чертам сходства также очевидный повтор в структурном членении провинции на два основных блока — южный, связанный с оседло-земледельческими культурами, и северный, с господствующими скотоводческими общностями. Все же прочие инновации в рамках ЦМП оказались в большей или меньшей степени неожиданными.

Начнем с поразительно ярких и кардинальных территориальных сдвигов. Произошло примерно трехкратное пространственное расширение ЦМП, когда общая площадь провинции на поздней фазе приблизилась к 4,5—5 млн км². «Агрессивные» подвижки культур южного блока были направлены по преимуществу в западном направлении, с охватом не только Восточной Анатолии, но всей Малой Азии, а также некогда коронных земель БКМП с их богатыми меднорудными месторождениями. В ЦМП вошли также южные ареалы Балканского п-ова и острова Эгейского бассейна.

В еще более энергичном темпе расширялась зона господства степных пастушеских народов. Если оседло-земледельческие культуры увеличили ареал своей зоны в 2—2,5 раза, то зона господства номадов (а она в ранний период была очень невелика) ныне возросла не менее чем пяти- или даже шестикратно. Культуры скотоводов ЦМП не только оккупировали весь ареал степных культур бывшей БКМП, но и продвинулись далеко на восток вплоть до южноуральских степей. С 3-го тысячелетия основным отличием этих культур стал едва ли обязательный ритуал подкурганых захоронений соплеменников, отчего весь блок культур зачастую именуют курганными. Степные курганные общности покрывали тогда все те огромные пространства, что в 4-м тысячелетии до н.э. отличались труднообъяснимым «опустыниванием» и хронологическим «провалом», о которых уже шла речь.

Тогда же отчетливые следы западных курганных культур появились очень далеко на востоке, на Алтае и даже восточнее, за створом знаменитых Джунгарских ворот — этой символически знаковой границы между западной и восточной частями Евразии. Там, в пустынных и полупустынных регионах Синьцзяна, удалось обнаружить захоронения номадов европейского типа с погребальным инвентарем, по облику близким к западным образцам. То были самые первые свидетельства западных первопроходцев по символическому мосту Степного пояса, соединявшему Запад и Восток. Напомним, что именно освоение моста в предыдущей статье предлагалось считать одним из наибо-



Первые свидетельства проникновения западных курганных культур далеко на восток. Вверху: Синьцзян (западный Китай), раскопки могильника Гумугоу в бассейне р.Тарим (пустыня Такла-Макан); «красавица Люлян» — реконструированный антропологами облик найденной здесь женщины европеоидного типа; глиняные сосуды, по форме и орнаментации сходные с посудой ямной общности и афанасьевской культуры. Внизу: сосуды из погребений ямной общности в Поволжье.

лее значимых *даров* мировой истории со стороны кочевых скотоводов [3]. В последующих фазах проявления этих свидетельств будут только нарастать.

Кардинальные перемены во взаимосвязях Севера и Юга

Однако вернемся к нашему прежнему мосту — Кавказскому, что в эпоху Прото-ЦМП связывал между собой Юг и Север. Мост продолжал функционировать, и даже существенно активнее, нежели в предшествующий период. При этом характер взаимосвязей между оседло-земледельческими культурами и степными скотоводами изменился,

пожалуй, кардинально. На третьей стадии узловая для фазы «Прото» культура огромных курганов, обозначавших всеми своими деталями элитный и особый «героико-победительный» статус погребенных, резко сместилась к югу — уже за хребты Большого Кавказа. На севере курганная культура называлась *майкопской*, теперь же более поздние ее формы получили наименования *марткопи-бедени* и *триалети* [1, 5]. В новых культурах отчетливо отразились фактически все «героические» признаки былой, майкопской общности: огромные курганы, могилы с каменными обкладками, исключительное обилие металла — бронзы, золота, серебра. На третьем этапе мы уже не различаем очевидных признаков губительных походов и раз-

рушений, подобных тем, что возникали перед археологами при раскопках Арслантепе с его «Царской могилой» степного вождя и с «арсеналом» великолепного бронзового оружия, навеки скрытым обрушившейся во время штурма стеной.

На третьей фазе картина распределения металла в обеих зонах провинции по сравнению с этапом Прото-ЦМП оказывается словно перевернутой на 180°. Теперь налицо полное доминирование Юга над Севером. Так, в базах данных против более 70 тыс. металлических предметов в южных культурах представлено всего около 11 тыс. в комплексах северных сообществ номадов. Но несопоставимо больший контраст являет, конечно, картина соотношения драгоценных металлов: против 47 тыс. золотых украшений и сакральных предметов на Юге нам известны всего 46 (!) мелких предметов на Севере (соотношение 1:1000). В известной мере сходным предстает и соотношение по серебру: примерно 5,7 тыс. южных изделий против 70 (!) на севере. И только по меди и медным сплавам пропорции проявляют себя уже не столь контрастно: около 16 тыс. на юге против 11 тыс. на севере.

Совершенно очевидно, что на третьей фазе развития ЦМП подмеченное соотношение несравненно ближе к истинной реальности, нежели на этапе предшествующем, когда картина пропорциональных соотношений в распределении металлов, особенно драгоценных, выглядела едва ли не фантастичной. Ведь именно в ареале южных оседло-земледельческих культур и на второй, и на третьей фазах были сосредоточены основные горно-металлургические центры, и именно отсюда направлялся на север поток металлов. Кажется, что во многом сыграли здесь свою решающую роль принципиальные сдвиги в идеологических канонах культур Юга. На фазе «Прото» южнее Большого Кавказа фактически отсутствовали стационарные могильники, где находили бы свое отражение различные градации земного статуса и доблестей покойного. В связи с этим вспомним, что еще в эпоху медного века (первая фаза) Варненский некрополь с массой медных орудий и золотых украшений не породил никаких последователей этих ритуалов на материалах Прото-ЦМП ни на юге, ни на севере: громады майкопских курганов на варненские могилы совсем не похожи.

И вот неожиданный поворот: отныне, уже на третьей фазе, все огромные коллекции золота и серебра южных культур оказываются сосредоточен-



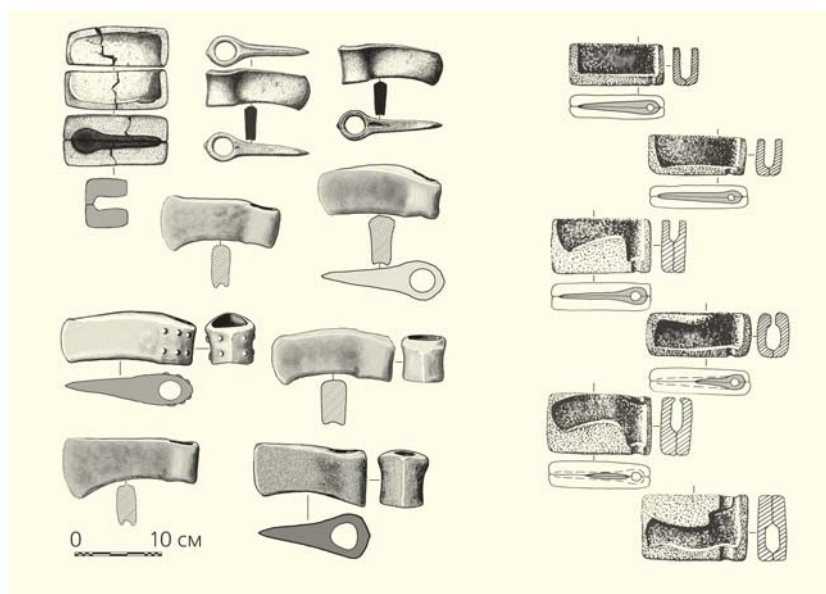
Золотые и серебряные кубки и украшения из подкурганых захоронений знати культур марткопи-бедени и триалети на южном Кавказе.

ными фактически в могильных комплексах. То были уже упоминавшиеся и переместившиеся на юг постмайкопские курганные наследники типа марткопи-бедени-триалети. На крайнем западе Малой Азии легендарный дилетант-археолог Генрих Шлиман извлек из царских могил второго города Трои огромные коллекции золота [6], которые принял за клад греческого царя Приама. Далеко на юге в царском некрополе Ура [7, 8] также были обнаружены фантастические по богатству сокровища. Такой перелом в погребальных обрядах отразил, безусловно, кардинальную смену идеологических установок в южной зоне и в представлениях носителей этих культур о характере земного и веземного бытия. С тех пор, по всей вероятности, и на Юге «симметричная» картина обеих — земной и веземной — сторон жизни стала господствующей: краткая земная и предполагаемая и желаемая вечная потусторонняя. Эту важнейшую грань следовало преодолевать обязательно во всеоружии добытых на земле регалий.

Аналогичная идеологема господствовала тогда и на чрезвычайно расширившемся пространстве домена пастушеских общностей. Вот только одновременно с этим заметно снизился уровень *героико-победительных* признаков на безграничном числе курганных некрополей, раскинувшихся от низовьев Дуная вплоть до южноуральских степей и даже на крайнем востоке — уже на Алтае. В степной зоне стало меньше курганов, подобных майкопским или закавказским, — могучих, насыщенных бронзовым оружием и драгоценными металлами. Разрыв между захоронениями «богатых» соплеменников и их «бедных» сородичей выглядел уже не столь вызывающим.



Коллекции из могильных комплексов южных пост-майкопских общностей: золотой шлем царя Мескаламдуга и «арфа» из некрополя Ура (справа), покрывало из золотых лепестков (так называемый клад Приама) из второго города Трои.



Циркумпонтийская провинция, Волго-Уральский регион. Втульчатые топоры, отлитые из каргалинской меди (слева), а также типичные литейные формы для топоров.



Вооруженные бронзовыми топорами высшие персоны древнейшего Шумера (гравировка на пластине из слоновой кости в храме богини Иштар в г.Мари).

Возможно, намного более существенным сдвигом предстает появление безусловных признаков зарождения и бурного развития собственной металлообработки, о которой степные народы на предшествующей фазе Прото-ЦМП, по всей видимости, не ведали. Теперь уже не редкость обнаружить во многих регионах глиняные литейные формы для отливки втульчатых топоров и тем более встретить их в захоронениях мастеров металлообработки. Топоры сходного облика, по всей вероятности, служили основным знакомым типом оружия для высшей элиты народов не только северной, но и южной зон ЦМП: об этом свидетельствуют, например, изображения фигурок высших персон древнейшего Шумера на далеком юге Месопотамии.

Может быть, еще более знаменательным стал переход к собственному горно-металлургическому производству у наиболее северных степных народов, которых археологи относят к огромной так называемой *ямной* общности культур. Это важнейшее событие было обусловлено началом эксплуатации ставшего в наши дни знаменитым гигантского горно-металлургического центра Каргалы на Южном Урале, связанного с оруденением типа медистых песчаников. Руду Каргалов встречают порой в сравнительно богатых захоронениях культур *ямной* общности, что было, видимо, знаком некой особой близости покойного к мистически-загадочным источникам даров природы. Но самым ярким свидетельством начала эксплуатации этих богатств служат наиболее ранние и строго датированные рубежом 4-го и 3-го тысячелетий до н.э. разработки на медь в Каргалах и, конечно же, захоронение в центре этого колоссального комплекса юного (12–13 летнего) мастера-литейщика с глиняной формой для отливки медного втульчатого топора.



Погребение юного мастера-литейщика ямной культуры на Каргалинском рудном поле. У левого виска намеренно положена расколотая литейная форма для втульчатого топора.

С началом каргалинских разработок медной руды популяции *ямной* общности начинают удовлетворять уже примерно половину своих запросов на металл за счет этого центра; другая половина все еще представляет собой отдаленный импорт закавказско-анатолийской мышьяковой бронзы. Примечательно, что в погребальном инвентаре параллельно существующей в течение 600—700 лет на тех же территориях культуры так называемой *катакомбной* общности преобладала (не менее 95%) импортная с юга мышьяковая бронза.

Коллапс ЦМП и апогей эпохи раннего металла

2-е тысячелетие до н.э., без какого-либо сомнения, предстало в роли ключевого периода в поступательном развитии огромного большинства евразийских культур. Тогда же наступил поздний бронзовый век, а вместе с ним и истинный апогей — четвертый, во многом важнейший и заключительный период эпохи раннего металла. Имен-

но в то время определились не только состав и характер блоков важнейших социальных общностей на всем гигантском пространстве континента, но также динамика контуров всех систем Евразии. В значительной степени результат протекавших тогда событий предопределил абрис этнокультурного и в определенном отношении даже социально-политического полотна, сохранившего многие из своих основных черт вплоть до Нового времени.

Обратимся к простому перечню наиболее значимых и кардинальных событий этого тысячелетия, определивших лицо позднебронзового века — истинного апогея эпохи раннего металла:

- распад ЦМП;
- металлургический «взрыв» или же стремительное четырехкратное увеличение территорий, охваченных металлоносными культурами Евразии и Северной Африки (так называемый *Большой скачок*);
- металлургическая революция в Восточной Азии;
- формирование в Евразии протяженной цепи новых металлургических провинций;
- трехтысячелетняя пространственная стагнация (или же *Великая стагнация*), а также связанное с ней начало формирования так называемого *Ядра* высокотехнологичных культур Евразии.

К концу 3-го тысячелетия черты некогда прочной и даже казавшейся монолитной системы ЦМП становились все более призрачными, и шаг за шагом она стала погружаться в уходящее. В течение примерно 2 тыс. лет этот невероятно сложный по своей структуре и огромный культурно-технологический массив служил безусловным центром и одновременно символом западной модели древней металлургии. Гигантская цепь тесно взаимосвязанных металлургических и металлообрабатывающих центров распалась, а ее отдельные звенья начали обособляться. Агонизирующая ЦМП породила клонов: возникло не менее четырех новых аналогичных систем. При этом нетрудно было заметить, что они уже достаточно определенно и порой весьма выразительно отличались друг от друга. Старт всех этих событий восходил по преимуществу к столетиям рубежа 3-го и 2-го или же к началу 2-го тысячелетия до н.э.

Размах территориального скачка, который совершили во 2-м тысячелетии металлоносные культуры Евразии, поразителен. Примерно за 500 (максимум 700) лет пространства, оккупированные металлоносными культурами, возросли четырехкратно: с 10—11 млн км² в 3-м тысячелетии до 40—43 млн км² во 2-м тысячелетии до н.э. [2, рис.8]. Надолго задержалось в так называемом неолитическом (*безметаллическом*) состоянии лишь население северной и северо-восточной Евразии.

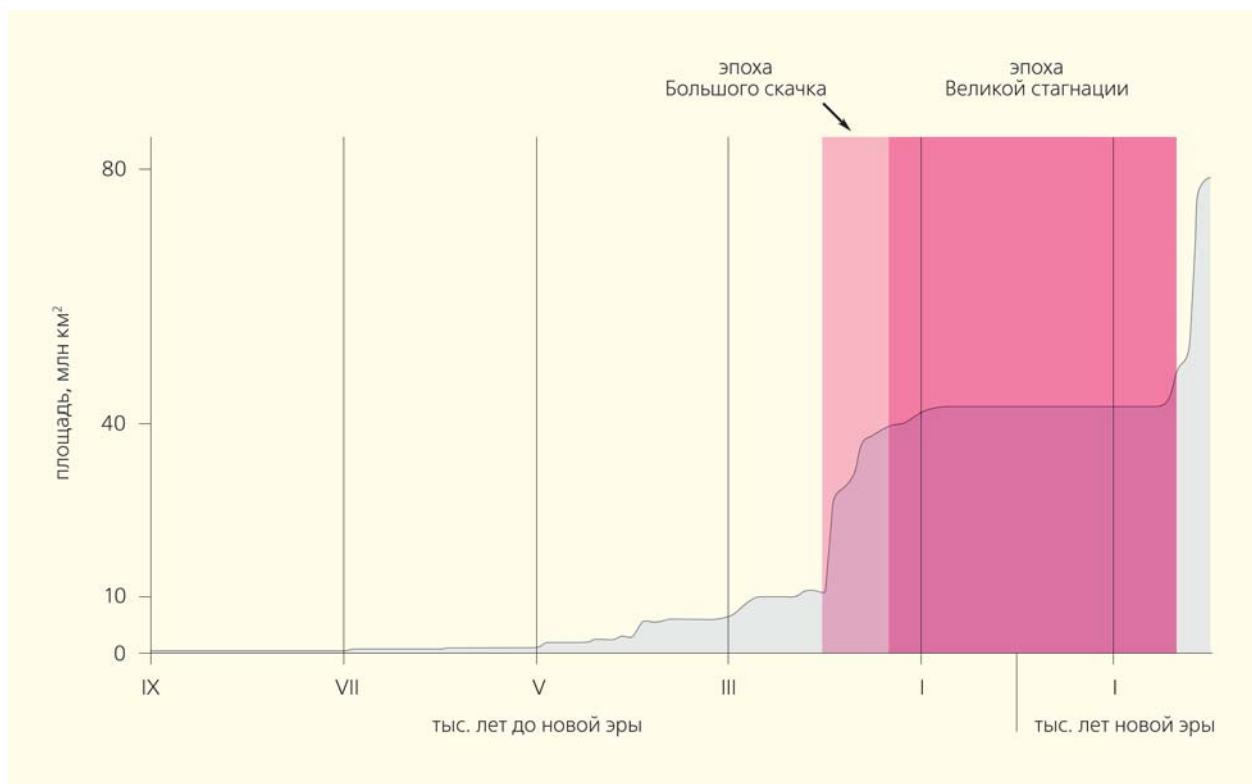
Чрезвычайное значение в этом процессе имела металлургическая революция в Восточной Азии. Ведь еще в 3-м тысячелетии до н.э. едва ли

не весь восток Азиатского континента был либо занят чисто неолитическими, совершенно не ведавшими металла культурами, либо же встречавшиеся там медные вещицы являли собой изрядную редкость. Ситуация с невыразительными и мелкими медными поделками в ярких неолитических общностях речных бассейнов Хуанхэ и Янцзы оказалась в чем-то сходной с эпохой протометалла в Анатолии и северной Месопотамии. Но во 2-м тысячелетии как бы неожиданный и весьма фантастичный рывок решительно выводит восточноазиатскую металлургию на передний план. Тогда на Востоке Азиатского континента сформировались три взаимосвязанные металлургические провинции, и одна из них оказалась тесно сопряженной с номадами восточной половины Степного пояса.

Теперь о *Великой стагнации*, под которой в данном случае подразумевается стагнация пространственная, но не технологическая. Ранее уже говорилось, что за территориальными рывками, взрывами или скачками фактически всегда следовали стабилизация/стагнация пространственная или же более или менее отчетливо выраженное торможение процессов территориального распространения развитых в технологическом отношении культур. И если подобного рода скачок можно аттестовать, к примеру, в качестве некоего позитива, то стагнацию, естественно, следовало

бы оценивать как негатив рывка. Но при этом представляется, что стагнация служит совершенно неотъемлемой фазой любого стремительного развития. Быстрое освоение социальными группами новых пространств, тем более сопряженных с какими-то неизвестными для носителей культуры технологическими вершинами, требует от каждой из культур времени для их освоения, что и обуславливает определенное торможение. Однако характер стагнации, о которой идет речь, никак не желает вписываться в рамки тех относительно кратких периодов торможения, которые нам пришлось наблюдать на примерах более ранних периодов. Здесь же стагнация растянулась на целых три тысячелетия. Согласитесь, что объяснить данный факт в рамках только что изложенной теории весьма трудно!

С *Великой пространственной стабилизацией/стагнацией* проявились четкие признаки нового гигантского феномена: зарождения обширного *Ядра* технологически высокоразвитых евразийских культур. Основа этого технологического превосходства опиралась, конечно же, на металл, на знание металлургии. Мысль эта не нова. Вот, скажем, американский этнолог Генри Льюис Морган, труды которого буквально поразили одного из апостолов марксистского исторического материализма Фридриха Энгельса, писал еще в 1877 г.: «Изобретение металлургии



Динамика расширения ареала металлоносных культур в Старом Свете. Особое внимание на графике привлекают территориальные и хронологические диапазоны эпох Большого скачка и Великой стагнации.

должно быть признано самым великим событием в истории человеческого опыта, подготовляющим цивилизацию».

Пространственный ареал *Ядра* евразийских культур выглядит застывшим на тысячелетия или же почти недвижимым. Создается даже впечатление, что высокотехнологичным сообществам никак не удавалось прорвать невидимые, но вместе с тем на удивление прочные границы каким-то странным и малопонятным образом сформировавшегося ареала. Причем это касалось не только необъятного севера Евразии, но и пространств Африки, лежащих к югу от Сахары. Народы южных областей Африканского континента будут самостоятельно пытаться осваивать эти непривычные для них технологии.

Более того, именно в тех территориальных рамках *Ядра*, в которые оказались включенными блоки высокотехнологичных культур, в течение последующих трех тысячелетий имели место подлинно и воистину судьбоносные события. Они были связаны с технологическими инновациями, и прежде всего с открытием металлургии железа или, например, с производством пороха и изобретением огнестрельного оружия. Сферу информатики подняла на новую ступень алфавитная система письменности. С той же эпохой оказались сопряженными и основные достижения в духовной

сфере и в попытках объяснения окружающего мира: ведь зарождение, развитие и распространение всех мировых религий не только Запада, но и Востока стало плодом деятельности культур эпохи Великой пространственной стагнации.

Все эти для нас хрестоматийно известные феномены зарождаются, развиваются, бесконечно бьются между собой, распадаются, гибнут. Однако такого рода события — великого или же не столь значимого ранга — почти никогда не выходили или же весьма незначительно вырывались за пространственные рамки того ареала, что, как для них, так и для Нового времени, оказался очерченным в границах *Ядра* еще культурами позднего бронзового века во 2-м тысячелетии до н.э. Старт стремительного и сокрушительного прорыва казавшихся едва ли не вечными и незыблемыми границ *Ядра* свершился лишь около 1500 г. (года во многом символичного) уже нашей эры. Именно тогда занялась заря эпохи Великих географических открытий, а если выразиться более определенно — эпохи Великой европейской колонизации нашей планеты...

Перед нами стоит задача понять, как на начальной стадии формирования евразийского *Ядра* складывалась судьба культур номадов евразийского Запада. А судьба эта оказалась насыщенной весьма странными парадоксами...■

Литература

1. Черных Е.Н. Культуры номадов в мегаструктуре Евразийского мира. М., 2013. Т.1.
2. Черных Е.Н. Структура Евразийского мира на фоне геоэкологии после открытия металлов: Север—Юг // Природа. 2011. №7. С.3—13.
3. Черных Е.Н. Кочевой мир Евразии: структура и динамика развития // Природа. 2014. №9. С.48—59.
4. Economic Centralization in Formative States. The Archaeological Reconstruction of the Economic System in 4th Millenium Arslantepe. V.3 / Ed. M.Frangipane. Roma, 2010.
5. Джапаридзе О.М. К этнокультурной истории грузинских племен в III тысячелетии до н.э. (раннекурганная культура). Тбилиси, 1998 (на грузинском языке).
6. Сокровища Трои. Из раскопок Генриха Шлимана: Каталог выставки. М., 1996.
7. Woolley C.L., Moorey P.R.S. Ur of the Chaldees. Ithaca; N.Y., 1982.
8. Art of the first cities: the third millenium B.C. from the Mediterranean to the Indus: Catalogue Metropolitan Museum of Art / Ed. J.Aruz. N.Y., 2003.

Антропологическое исследование черепа последнего Инки

С.В.Васильев, Е.В.Веселовская, А.П.Пестряков

Атауальпа — при звуке его имени трепетали сердца тысяч подданных огромного государства Тауантинсуйу, больше известного нам как империя инков. Хроники свидетельствуют о жестокости и властолюбии последнего императора. Однако среди свидетельств испанских и индейских хронистов найдется очень мало сведений относительно облика Атауальпы. Известно лишь, что он отличался благообразием лица, сильным гибким станом и более высоким ростом, чем его современники. Существует много художественной и научной литературы, посвященной этой знаменитой исторической личности времен конкисты, однако вниманием исследователей до сих пор был обойден такой важнейший источник информации, как останки великого воина и политика. Современная антропология располагает новейшими методиками изучения черепа, которые позволяют пролить свет на особенности внешности легендарного императора и доподлинно восстановить его портрет.

Череп, судя по всему принадлежавший последнему главе государства инков, хранится в Музее человека в Париже*. На че-



Сергей Владимирович Васильев, доктор исторических наук, заведующий Центром физической антропологии Института этнологии и антропологии РАН. Круг интересов в антропологии — от вопросов морфологии и таксономии в процессе эволюции рода *Ното* и проблем этологии приматов до решения задач формирования ряда народов мира (египтян, русских, белорусов, карелов).



Елизавета Валентиновна Веселовская, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник и руководитель лаборатории антропологической реконструкции того же института. Область научных интересов — антропологическая реконструкция, идентификация личности по костным останкам, морфология человека, эволюционная антропология.



Александр Петрович Пестряков, кандидат исторических наук, старший научный сотрудник того же института. Специалист по этнической антропологии и краниологии. Автор краниологической классификации современного населения Земли.

* Авторы выражают искреннюю признательность Музею человека в Париже и лично Филиппу Менесье за неоценимую помощь в работе над материалом.

репной коробке сзади слева имеется надпись «Atahualpa Antofagasta – Bolivia. Don Senechal de la Grande №97», его каталожный номер 34640. Он измерен и описан нами по стандартной краниологической программе и сфотографирован анфас и в профиль с расстояния 1.8 м. По фотографиям методом антропологической ре-

конструкции восстановлен прижизненный облик последнего Инки. Изучив череп, также сопоставили краниологические характеристики Атауальпы с параметрами индейцами Анд и с южноамериканскими популяциями в целом.

Историческая справка

Атауальпа родился в семье правителя империи Уайна Капаки в самом конце XV в. Империя инков (Тауантинсуйу) была гигантским по тем временам государственным образованием в Южной Америке и включала в себя территории современного Перу, большей части Эквадора и частично Боливии и Чили. Появление племени инков зафиксировано в XI в., их исконная территория находилась близ знаменитого высокогорного озера Титикака, а язык принадлежал к группе кечуа. В дальнейшем это пастушеское племя распространилось на север и северо-запад, подчинило себе все местные племена и в XV в. создало свое мощное государство. Большая часть этих территорий — это высокогорная страна системы Анд, по масштабу абсолютных высот и территориальной протяженности сравнимая с азиатскими горными системами Тибета и Гималаев.

Население страны делилось на три больших социальных группы. Верхний привилегированный слой представляли собой потомки племени инков. Основная масса населения, крестьяне, пастухи и ремесленники были потомками завоеванных индейских племен. Они несли обязательную трудовую и военную повинность в пользу государства, возглавляемого инками, строили и ремонтировали дороги и мосты, работали на постройке дворцов и храмов, трудились в государственных золотых и серебряных коях. Часто практиковалась массовая переброска крестьян в другие районы страны для выполнения трудовой повинности. Иногда переселения вызывались экономическими, а иногда — политическими причинами, например, для заселения вновь завоеванных провинций. Ремесленники получали от государства сырье, а готовые продукты и изделия в обязательном порядке сдавали государству. Все основное население — и мужчины и женщины — с детства до глубокой старости обязано нести трудовые повинности. Даже калекам предписывались определенные виды работ. Низшим слоем населения были государственные рабы — янакуна. Они обрабатывали государственную землю, пасли государственные стада лам и были слугами в домах инков. Основа хозяйства империи — земледелие. Главные возделываемые культуры — картофель и кукуруза. Законодательно вся земля была собственностью Инки (т.е. верховного правителя) и давалась крестьянам в пользование. Среди женщин особую категорию составляли «избранные». Из всех деревень чиновники отбирали самых кра-



Череп великого Инки Атауальпы, хранящийся в Музее человека в Париже.

Фото С.В.Васильева

сивых девочек восьми-девяти лет и их воспитывали далее в специальных домах типа монастырей до 13 лет. В дальнейшем часть из них попадали в жены инкам, а часть (солнечные девы) выполняли культовые ритуалы в честь богов солнца, луны и звезд.

Высшим сословием инков регламентировалась вся жизнь остального населения. Контроль над всеми работами осуществлялся чиновниками. Империи инков отличали суровые законы в отношении нарушавших трудовую дисциплину. Этический кодекс заключался в трех основных запретах: не воровать, не лгать, не лениться. Крестьяне не имели права покидать свои деревни без разрешения, семейные отношения также находились под жестким контролем государства. Все мужчины, достигшие определенного возраста, обязаны были создать семью. Раз в год каждую деревню посещал особый чиновник, который проводил публичную церемонию заключения браков.

Представители высшего сословия этого государства были потомками племени инков, того самого, которое завоевало и поработило в XIV—XV вв. все племена обширной территории будущей империи. Глава государства именовался Инкой, этот пост передавался по наследству по мужской линии, однако официальными женами Инков могли быть лишь их родные сестры. Члены высшей социальной группы пользовались многочисленными привилегиями, в частности могли иметь нескольких жен и наложниц, число которых зависело от социального статуса мужа.

Иерархический чиновничий аппарат владел и использовал особое письмо (кипу), представлявшее собой сложную систему узелков на специальных шнурках. Это тайное письмо до сих пор до конца не разгадано.

При 11-м Инке Уайне Капаке — отце Атауальпы — империя достигла наивысшего расцвета.

Уайн Капака завещал власть другому своему сыну Уаскару — брату Атауальпы, с чем не мог смириться молодой амбициозный будущий последний великий Инка Атауальпа. После смерти Уайна Капаки в 1527 г. началась гражданская война между претендентами на высшую власть в империи. Приблизительно к этому времени относят разведочные походы Франциско Писарро, будущего покорителя империи. В 1532 г. Уаскар потерпел поражение, и Инкой стал Атауальпа. Но в том же году его предательски захватил Писарро, и в результате надуманных, сфабрикованных обвинений Инка был казнен, хотя и предлагал огромное количество золота за сохранение ему жизни. В течение последующих нескольких лет вся некогда могущественная империя инков оказывается под властью испанских конкистадоров. Причиной столь быстрого завоевания Тауантинсуйу была огромная социальная пропасть, отделявшая высший слой власти от простонародья. Такова стандартная судьба тоталитарного государства.

Эта загадочная цивилизация оставила после себя грандиозные архитектурные памятники, прекрасно выполненные транспортные пути (дороги и мосты), и это — не зная колеса и практически не используя металлов.

Методы исследования

Краниологическое изучение особенностей строения черепной коробки. Нами уже предпринимались попытки исследовать останки исторических персоналий [1–3]. В ряде случаев реконструкция лица по черепу помогала идентифицировать личность [4, 5].

Череп Атауальпы имеет сравнительно неплохую сохранность. Исследование проводилось по классической краниологической программе [6]. Известно, что палеоантропологический материал (в нашем случае краниологический) требует иной классификационной схемы, чем привычная для антропологов расово-морфологическая. Многие важные расово-диагностические признаки (цвет кожи, глаз, волос; форму волос, степень обволоченности тела и т.д.) невозможно фиксировать на палеоматериале. Поэтому необходима собствен-

но краниологическая классификация наличного антропологического материала. Предлагая свое понимание основ подобной классификации, профессор В.В.Бунак писал: «... положить в основу классификации наиболее существенные и морфологически важные признаки... Наиболее удовлетворяют этому требованию три основные оси черепа, определяемые величиной трех его диаметров: продольного, поперечного и высотного...» [7, с.20]. И далее: «Только учет абсолютных размеров всех трех основных диаметров черепа и их различных сочетаний позволяет нам разобраться в сложных генетических отношениях отдельных форм» [7, с.50].

Около 20 лет назад мы разработали краниологическую классификацию современного населения Земли, в основу которой положены эти идеи Бунака [8, 9]. При сравнительном изучении более 300 краниосерий, близких к современности, выделено три доминирующих краниотипа, к которым принадлежит основная масса современного населения планеты. Они получили название по зонам своего происхождения и первичного распространения — тропиды, голарктиды и пацифиды. Кроме этих панюкуменных краниотипов в дальнейшем были установлены и некоторые иные краниотипы, имеющие меньшее территориальное распространение, и названные нами локальными.

В табл.1 даны характеристики абсолютных размеров и формы трех панюкуменных краниотипов. Представлены средние данные по девяти параметрам черепной коробки, обычно используемым нами в других работах. Четыре из них характеризуют абсолютные величины черепа: наибольшие продольный (№1), поперечный (№8) и высотный (№17) его диаметры (номера соответствуют стандартному краниологическому бланку Р.Мартина) и общая ростовая величина (ОРВ), рассчитываемая векторным сложением величин этих диаметров. Другие пять параметров характеризуют форму черепной коробки. Это черепной указатель (ЧУ) — отношение наибольшего поперечного диаметра черепа к наибольшему продольному (в %), высотно-поперечный указатель (ВПУ) — отношение высотного диаметра черепа к поперечному (в %), указатель долихоидности (УД) — относительная длина черепа, указатель брахиоидности (УБ) — его относительная ширина и указатель гипсиоидности (УГ) — его относительная высота. Величины трех последних параметров вычисляются единым образом способом и представляют собой средние геометрические для отношений каждого из трех названных диаметров черепной коробки к двум оставшимся (в %).

Таблица 1

Краткая характеристика панюкуменных краниотипов

Краниотип (число серий)	№1	№8	№17	ОРВ	ЧУ	ВПУ	УД	УБ	УГ
Тропиды (69)	183.5	132.4	134.1	263.1	72.2	101.3	137.8	84.5	86.0
Голарктиды (144)	180.2	145.0	132.8	266.7	80.5	91.7	129.9	93.8	82.2
Пацифиды (121)	179.5	140.3	136.7	265.7	78.3	97.4	129.7	89.7	86.1

Дадим основные диагностические характеристики трех панойкуменных (глобальных) краниотипов, которые лишь частично совпадают с принятой расовой классификацией человечества.

Тропиды (экваториальная и веддо-австралоидная расы) имеют минимальную величину черепной коробки (параметр ОРВ) при наибольшем продольном диаметре и наименьшем поперечном. По абсолютной высоте черепной коробки они занимают положение между двумя другими панойкуменными краниотипами. Но именно у них отношение высотника к поперечнику зачастую имеет максимальную величину. Преобладает рост черепной коробки в длину и в высоту. Эпохальная тенденция брахикефализации, зафиксированная на большей части территории Евразии, у тропидов практически незаметна. Среди них доминирует долихокrania (ЧУ < 75.0).

Голарктиды (европеоидная раса и континентальные монголоиды), будучи антиподами тропидов, имеют максимальную величину коробки, с наиболее широкой и наиболее низкой формой. Среди изученных серий голарктидов на среднегрупповом уровне долихокраниями оказались 4.5%, а брахикраниями 61.9%. Доминирует брахикrania (ЧУ > 80.0).

Пацифиды (тихоокеанские монголоиды и американоидная раса — америнды) сочетают некоторые черты тропидов и голарктидов. Черепная коробка у них по общей величине, по абсолютной и относительной длине почти такая же, как у голарктидов, но при этом всегда абсолютно и относительно высокая и умеренно широкая. Доминирует мезокrania (ЧУ в пределах 75.0—79.9).

Антропологическая реконструкция. Метод восстановления лица на основе черепа широко применяется во всем мире, прежде всего в целях идентификации личности по костным останкам. Большое значение он имеет и для иллюстрации стадий эволюции человека. Восстановление внешнего облика исторических деятелей прошлого и представителей различных археологических культур широко применяется в музейном деле и для решения вопросов происхождения, миграции, становления различных антропологических типов во времени и в пространстве. Научные основы метода заложил знаменитый российский ученый Михаил Михайлович Герасимов, долгие годы проводивший скрупулезные исследования соответствия структур черепа и лица [10]. Ученые всего мира признают приоритет российской школы антропологической реконструкции. В созданной Герасимовым лаборатории продолжают работу по совершенствованию метода восстановления облика на основе черепа. К настоящему времени собран обширный материал, характеризующий особенности лицевой морфологии, охватывающий ряд контрастных в антропологическом отношении групп населения. Исследования проводились на живых людях и позволили получить

многочисленный достоверный материал по двум составляющим направлениям методики антропологической реконструкции: по измерению толщины мягких покровов на различных участках головы и по изучению взаимозависимостей между отдельными физиономическими признаками и подлежащими морфологическими структурами черепа. Для восстановления внешнего облика используют стандарты толщины мягких покровов, полученные с применением ультразвука на живых людях [11]. Отдельные физиономические размеры мы рекомендуем рассчитывать по уравнениям регрессии, где в качестве независимых признаков использованы черепные характеристики, для которых получены высокие значения корреляционных связей [12].

Антропологическая реконструкция может быть выполнена в зависимости от конкретных целей в виде контурного изображения, графического или скульптурного портрета. Однако независимо от назначения реконструкции главное — это воспроизведение индивидуальных черт лица человека, которому принадлежит данный череп, с учетом его расовых особенностей. Процесс восстановления внешнего облика начинается с подробного описания всех индивидуальных особенностей строения черепа и его измерения по общепринятой краниологической программе, дополненной рядом признаков, имеющих значение при реконструкции [15, 16]. Следующий этап — построение контура лица в профиль и анфас на основе обводов черепа, выполненных либо с помощью специального прибора — диоптрографа, либо на основе фотографий, сделанных с большого расстояния в определенных нормах.

Контурная реконструкция — начальный этап для любого другого вида реконструкций. Графическая реконструкция выполняется уже на основе контурного изображения. Сложность ее состоит в том, чтобы правильно передать все светотени, создавая корректное впечатление о ширине лица, его профилировке, положении глаз и т.д. Графическая реконструкция, по сравнению со скульптурной, более наглядна и применяется шире, так как требует меньше времени. Опираясь на серию графических реконструкций из одного могильника, численность которых лимитируется лишь объемом краниологического материала, можно получить достаточно полную антропологическую характеристику изменчивости морфологического типа конкретной популяции [13].

Для нас каждый череп строго индивидуален, а методика воспроизведения черт внешности по костным структурам точна и выверена до мелочей. Поэтому, работая над реконструкцией, мы четко и последовательно формируем структуры лица, не отвлекаясь на создание художественного образа: главное — это доскональная передача индивидуальных черт внешности. Именно поэтому восстановление лица по черепу широко применя-

ется в судебной практике: мы восстанавливаем индивидуальный портрет человека с присущими ему характерными чертами, такое лицо узнаваемо вне зависимости от возраста и эмоционального состояния [14].

Череп Атауальпы

Ряд морфологических характеристик черепа свидетельствует о принадлежности его мужчине. Череп имеет сравнительно неплохую сохранность. По облитерации (зарастанию) швов можно определить индивидуальный биологический возраст индивида в интервале от 30 до 40 лет.

Череп Атауальпы был измерен нами по классической краниологической программе, подробные цифры приведены в нашей публикации [15]. Вот основные параметры: продольный диаметр (№1, обозначение признака по Мартину) 178 мм, поперечный (№8) — 142 мм, высотный от ба (№17) — 135 мм, длина основания черепа (№5) 102 мм, наименьшая ширина лба (№9) 89 мм, наибольшая (№10) — 124 мм, ширина основания черепа (№11) 124 мм, ширина затылка (№12) 116 мм, черепной указатель (№8/№1) 79.8%, высотно-продольный от ба (№17/№1) — 75.8%, высотно-поперечный от ба (№17/№8) — 95.1%, лобная дуга (№26) 123 мм, лобная хорда (№29) 106 мм, указатель изгиба лба (№29/№26) 86.2%, длина основания лица (№40) 100 мм, скуловой диаметр (№45) 132 мм, верхняя высота лица (№48) 62 мм, полная высота лица (№47) 103 мм, верхняя ширина лица (№43) 102 мм, средняя ширина лица (№46) 96 мм, высота носа (№55) 48 мм, ширина (№54) — 22 мм, носовой указатель (№54/№55) 45.8%, ширина орбиты от mf (№51) 38 мм, высота орбиты (№52) 38 мм, орбитальный указатель (№52/№51) 100%, длина альвеолярной дуги (№60) 50 мм, ширина альвеолярной дуги (№61) 61 мм, глубина клыковой ямки (FC) 5 мм, максилло-фронтальная ширина (MC) 16 мм, максилло-фронтальная высота (MS) 6 мм, симотическая ширина (SC) 6 мм, симотическая высота (SS) 3 мм, симотический указатель (SS/SC) 50.0%, угол выступания носа (№75.1) 23°, назо-молярный угол (№77) 142.0°, зиго-максиллярный угол ($\langle zm \rangle$) 128.3°, наименьшая ширина ветви (№71a) 35 мм, мышечковая ширина (№65) 122 мм, угловая ширина (№66) 91 мм, передняя ширина (№67) 43 мм, высота симфиза (№69) 28 мм, высота тела (№69.1) 26 мм, толщина тела (№69.3) 11 мм.

Форма черепной коробки при взгляде сверху оvoidная, т.е. наибольшая ширина черепа приходится на заднюю часть мозговой коробки. Лобный и теменные бугры сглажены. Череп Атауальпы может быть описан как среднеудлиненный и относительно широкий — мезокранный с тенденцией к брахикрании. Высотно-продольный указатель высокий, что свидетельствует о гипси-

крании. В категорию метриокранных черепов попадает он по высотно-поперечному указателю. Оба показателя говорят об относительно высоком черепе.

Лоб скошенный и визуально довольно узкий. Абсолютный размер наименьшей ширины лба входит в категорию очень малых, а наибольшей — в категорию больших. По лобно-поперечному указателю череп микроземный (узколобий). По достаточно высокому указателю кривизны лобной кости можно сделать вывод о весьма малом ее изгибе. Развитие надпереносья оценивается в два балла по шестибалльной шкале Брока. Надбровные дуги (тип II) продолжают за середину верхнеорбитального края, но не заходят на надглазничный треугольник.

Теменные бугры расположены высоко. Относительно низкий указатель кривизны теменных костей говорит о небольшом радиусе их изогнутости. Сосцевидные отростки довольно крупные, имеют длину около 2 см и оцениваются баллом 2. Затылок широкий. Сильное развитие имеют верхние выйные линии (*linea nuchae superior*), которые представляют собой валикообразные массивные структуры, следует отметить также и необычное развитие наружного затылочного выступа (*protuberantia occipitalis externa*). Ярко выражена височная линия. Очень сильно затерты мышелки.

Лицевая часть черепа неширокая и относительно низкая, по верхнелицевому указателю — эуриенная (показатель низколицести). Углы горизонтальной профилировки относятся к категории средних и малых, т.е. лицо даже по европейским меркам резко профилированное, особенно в нижней части. Прогнатизм подтверждается значениями указателя выступания лица (указатель Флоуэра). Краниофациальный вертикальный указатель имеет низкое значение, т.е. наблюдается тенденция сочетания низкого лица и относительно высокой мозговой коробки. Краниофациальный поперечный указатель имеет средние значения, что говорит о сочетании среднеширокого лица и относительно широкой мозговой коробки.

Орбиты низкие и относительно узкие (гипси-конхные). Верхний край орбиты притуплен. Надглазничные каналы замкнуты. Форма верхнего края глазниц округлая. Низ глазниц имеет несколько приспущенный латеральный край. В абсолютных размерах нос невысокий и относительно узкий (лепторинный), то же подтверждается и носовым указателем. Угол выступания носа средний. Симотический и максилло-фронтальный указатели входят в категорию больших, что говорит о значительной высоте переносья. Зиго-максиллярная область узкая, грацильная. Нижний край грушевидного отверстия — *fossae prae-nasales*, т.е. боковые края грушевидного отверстия не переходят в нижний край, а продолжают

вниз и сходятся ниже нижнего края. Форма спинки носовых костей в профиль изогнута.

Латеральное возвышение нижней челюсти развито средне, переходя в краевой валик, и образует хорошо выступающий задний краевой бугорок. Передний краевой бугорок хорошо рельефно выражен. Верхний латеральный валик практически отсутствует. Боковое возвышение на ветви развито слабо. Ярко выражена жевательная ямка со слегка вывернутыми наружу углами нижней челюсти. Подъязычная ямка развита слабо. Треугольный валик ветви развит хорошо, от него отходят внутренние венечный и мышцелковый гребни. Внутренний мышцелковый гребень у головки суставного отростка образует верхний крыловидный бугорок. На внутренней поверхности углов нижней челюсти имеется хорошо выраженная бугристость.

Нижнечелюстные отверстия большие и имеют костную пластинку спереди в виде заостренного гребня. Суставная вырезка неглубокая. Подбородочные отверстия располагаются в середине тела по высоте на уровне вторых премоляров. По абсолютным размерам тело нижней челюсти довольно низкое и грацильное.

Сравнение с краниотипами

Перейдем к генерализованным параметрам мозговой коробки. Интересно сравнить данные величины изучаемых параметров по трем панойкуменным (основным) краниотипам с 28 сериями индейцев Южной Америки, в том числе с шестью сериями индейцев территории Анд, а также с индивидуальными краниологическими характеристиками черепа Атауальпы. Данные по южноамериканским сериям взяты из работы М.Ньюмана [16].

Из анализа представленной таблицы следует, что индейцы Южной Америки как целое органично вписываются в панойкуменный краниотип пацифидов, куда, по нашим предварительным исследованиям [9], относятся и тихоокеанские монголоидные группы Азии, и подавляющее большинство американоидов. Следует отметить, что андийские краниосерии на фоне южноамериканских индейцев имеют несколько меньшую величину черепной коробки и по форме сдвинуты в сторону брахикрании. Подобными же особенностями отличается и индейское земледельческое население юго-запада США. По материалам других исследователей (работы Г.Моранта по краниологии [17] и одонтологические исследования

Таблица 2

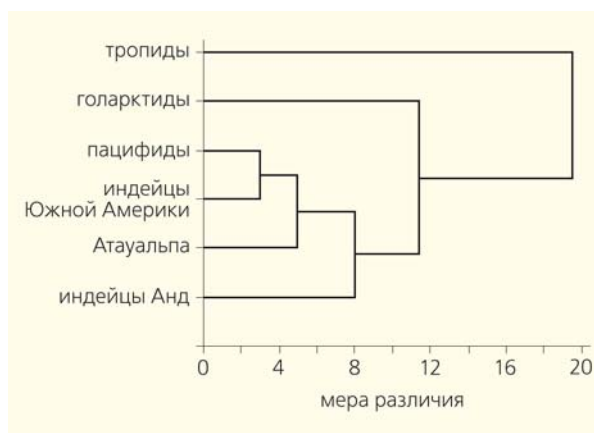
Сравнение параметров черепа

Краниотип (число серий)	№1	№8	№17	ОРВ	ЧУ	ВПУ	УД	УБ	УГ
Тропиды (69)	183.5	132.4	134.1	263.1	72.2	101.3	137.8	84.5	86.0
Голарктиды (144)	180.2	145.0	132.8	266.7	80.5	91.7	129.9	93.8	82.2
Пацифиды (121)	179.5	140.3	136.7	265.7	78.3	97.4	129.7	89.7	86.1
Индейцы Южной Америки (28)	180.5	140.1	135.0	265.5	77.7	96.5	131.3	89.8	85.0
Индейцы Анд (6)	175.7	137.8	134.7	259.7	78.5	97.8	129.0	89.6	86.6
Атауальпа	178	142	135	264.7	79.8	95.1	128.6	91.6	84.9

А.А.Зубова [18]), население Анд имеет сходство с обитателями весьма отдаленного от него региона Азии — с группами Тибета и Непала.

На общем фоне андийских краниосерий череп Атауальпы характеризуется большей величиной, практически такой же, как в среднем по южноамериканским индейцам, а по форме очень близок к современному населению Анд. Скорее всего, более крупные размеры головы отличали всех представителей высшей касты за счет лучших условий жизни и направленного полового отбора.

По данным табл.2 была построена дендрограмма, отражающая степень сродства между краниосериями и показывающая место Атауальпы среди них. В одном большом кластере оказались панойкуменный краниотип пацифидов, индейцев Южной Америки (суммарно), индейцев Анд и данные по черепу Атауальпы. При этом череп последнего занимает промежуточное положение между пацифидами (в целом) и индейцами Южной Америки, с одной стороны, и индейцами Анд, с другой.

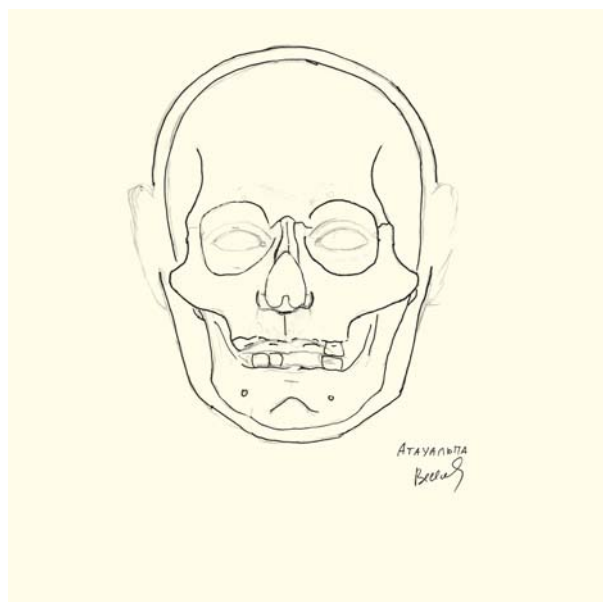
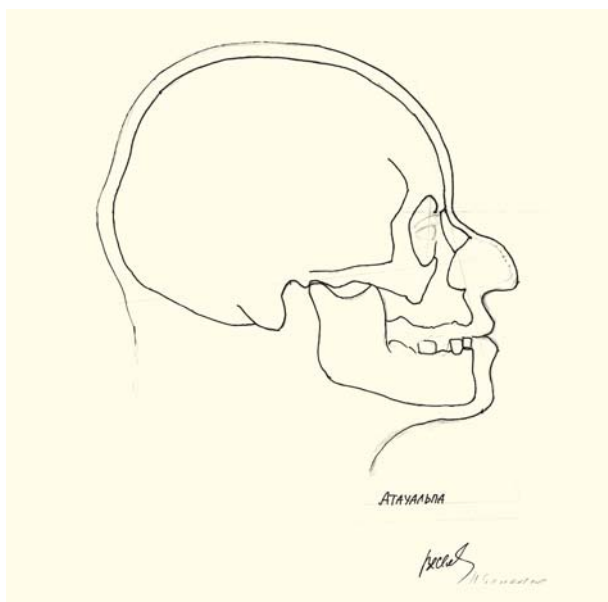


Дендрограмма таксономических расстояний между краниосериями, показывающая место Атауальпы среди них.

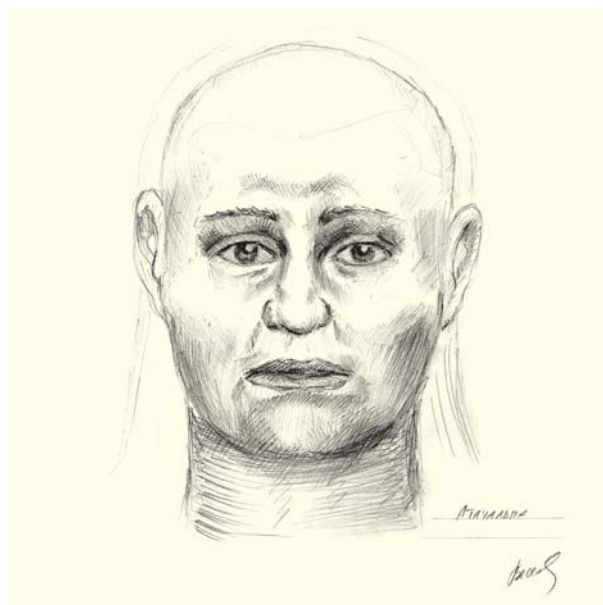
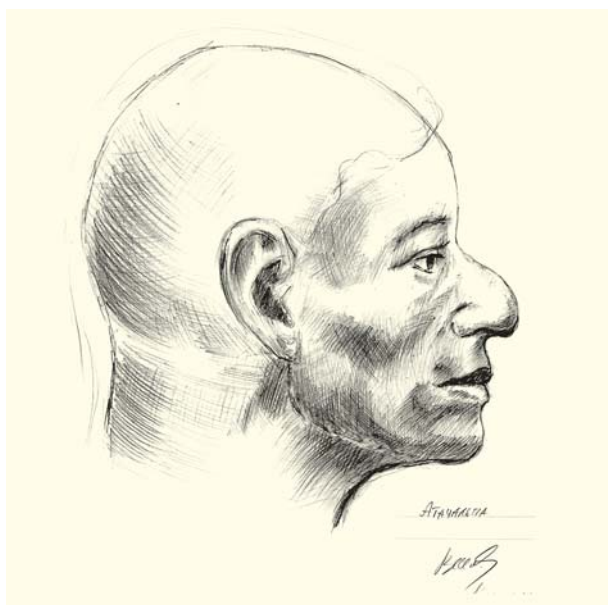
Реконструкция облика последнего Инки

Работа над восстановлением портрета началась с анализа индивидуальных особенностей черепа. По краниологическим размерам были рассчитаны прижизненные размеры лица, такие как физиономическая высота лица, ширина носа и рта, высота и ширина глазной щели, высота уха. Фотографии анфас и в профиль были распечатаны в натуральную величину, и на их основе выполнены контурные реконструкции. В данном случае мы использовали стандарты толщины мягких по-

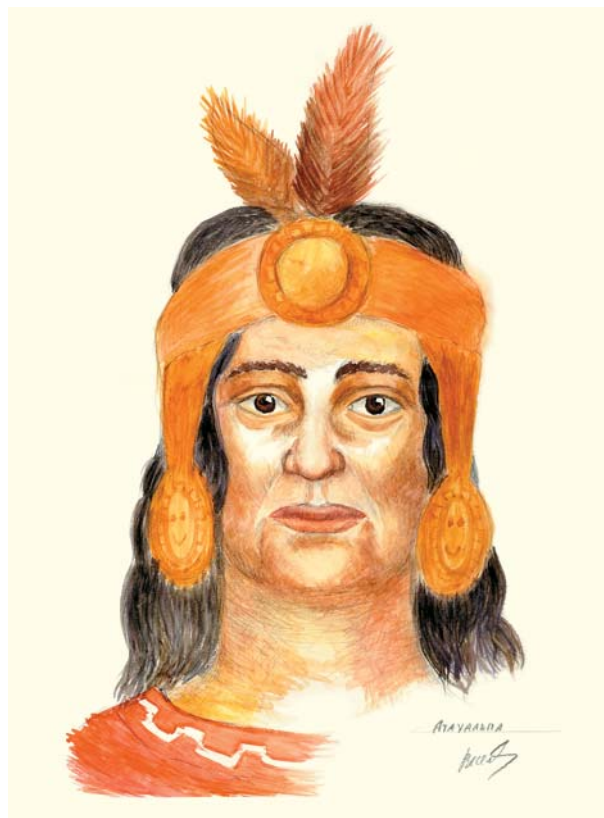
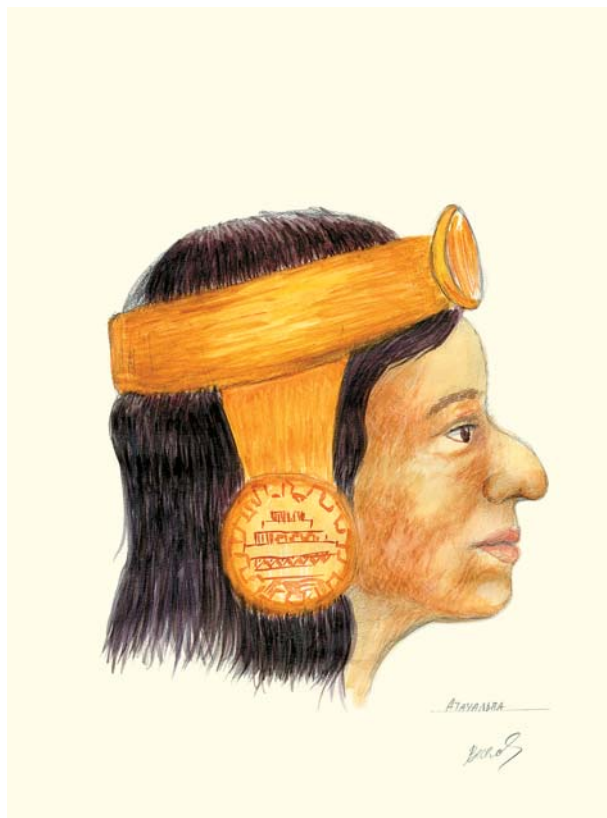
кровов и уравнения пересчета размеров лица для монголоидных групп. Обращает на себя внимание необычная форма носа Атауальпы. Методика воспроизведения по черепу профиля наружной спинки носа была разработана Г.В.Лебединской, ученицей Герасимова, и в настоящее время многие ученые предпочитают именно этот способ [19]. Если мы обратимся к современной расовой классификации, то увидим, что именно для коренного населения Западного полушария характерно значительное выступание носа в хрящевой части при умеренном выступании носовых кос-



Контурные реконструкции облика Атауальпы, профиль и анфас. Автор Е.В.Веселовская.



Графические портреты Атауальпы, профиль и анфас. Авторы реконструкции Е.В.Веселовская и Е.А.Просикова.



Художественные портреты Атауальпы, профиль и анфас. Автор Е.А.Просикова.

тей. Именно так и можно описать форму наружной спинки носа, построенную на основании носовой вырезки черепа на контурной реконструкции Атауальпы. Далее на основе контурных реконструкций выполняли графические портреты анфас и в профиль, подчеркивая штриховкой распределение плоскостей поверхности лица. Здесь мы сознательно не изображали волосы на голове и растительность на лице, последняя, кстати, крайне мало развита у представителей индейских племен Латинской Америки. Разработанная в лаборатории программа «Словесный портрет по черепу», а также выполненные портреты позволяют довольно подробно описать, как выглядел последний император могущественного государства инков. В целом его внешность можно охарактеризовать следующим образом. Мезокефалия сочетается с высоким сводом, лицо среднее по ширине округлой формы. Лоб неширокий, средней высоты. Линия лба в профиль немного выпуклая, направлена вертикально. Надбровный рельеф выражен крайне незначительно, что, впрочем, характерно для большинства представителей монголоидного антропологического ствола. Контур бровей ближе к прямому. Глазные яблоки в глазницах поставлены выпукло, глазная щель крупных размеров, складка верхнего века развита по всей длине. Нос значительно выступа-

ет в хрящевой части, имеет горбинку, в целом форма спинки в значительной степени выпуклая. Ширина переносья и спинки носа небольшая, в крыльях нос средней ширины. Общая высота носа большая. Верхняя губа высокая, рот широкий. Подбородок по высоте небольшой, но достаточно широкий, вперед выступает незначительно.

* * *

Какие выводы можно сделать по результатам изучения черепа последнего Инки? Череп Атауальпы мезокранный, с тенденцией к брахикрании. Форма черепной коробки при взгляде сверху — овоидная. Лоб скошенный и достаточно узкий. Рельеф развит слабо. Затылок широкий. Лицевой скелет низкий и относительно неширокий. Горизонтальная профилировка хорошо выражена в нижней части лица. Имеется выраженный альвеолярный прогнатизм. Орбиты небольшие, имеют округлую форму. Нос невысокий и узкий — лепторинный. Спинка носа изогнутая. Зигмаксиллярная область и нижняя челюсть достаточно грацильные.

В сравнительном анализе череп Атауальпа занимает промежуточное положение между пацифидами (в целом) и индейцами Южной Америки, с одной стороны, и между индейцами Анд, с другой. На фоне характеристики андийских краниосерий череп Атауальпы отличается большей вели-

чиной, практически такой же, как в среднем по южноамериканским индейцам, а по форме очень близок к современному населению Анд.

Выполненные и представленные портреты позволяют хорошо рассмотреть антропологические особенности лица и головы Атауальпы. ■

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН (грант «Изменчивость антропологического облика населения Центральной России от древности до позднего средневековья на сравнительном фоне окружающих территорий») и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 12-06-00153-а).

Литература

1. *Васильев С.В., Боруцкая С.Б., Халдеева Н.И.* Антропологическое исследование останков жен Ивана III — великих княгинь Марии Борисовны Тверской и Софьи Палеолог // Тр. III (XIX) Всероссийского археологического съезда. Т. II. Великий Новгород; Старая Русса, 2011. С.221—222.
2. *Васильев С.В.* Три сюжета об идентификации исторических личностей методами физической антропологии // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Геоархеология. Этнология. Антропология. 2012. №1. С.246—265.
3. *Васильев С.В., Герасимова М.М., Боруцкая С.Б., Халдеева Н.И.* Антропологическое исследование костных останков великого князя Андрея Боголюбского: спустя 70 лет // Вестник Московского университета. Серия XXIII: Антропология. 2012. №4. С.54—69.
4. *Васильев С.В.* К вопросу о тайне «золотого гроба» // История и культура древнего и раннехристианского Египта. М., 2001. С.35—44.
5. *Васильев С.В.* Лицо фараона // Вестник антропологии. 2007. Вып.15. Часть 2. С.439—450.
6. *Алексеев В.П., Дебец Г.Ф.* Краниометрия. М., 1960. С.128.
7. *Бунак В.В.* Основные морфологические черты черепа человека и их эволюция // Русский антропологический журнал. 1922. Т.12. Кн.1/2. С.24—52.
8. *Пестряков А.П.* Расы человека в краниологической классификации населения тропического пояса // Современная антропология и генетика и проблема рас у человека. М., 1995. С.43—90.
9. *Пестряков А.П., Григорьева О.М.* Краниологическая дифференциация современного населения // Расы и народы. Ежегодник. Вып.30. М., 2004. С.86—131.
10. *Герасимов М.М.* Основы восстановления лица по черепу. М., 1949.
11. *Веселовская Е.В.* Единство закономерностей внутригрупповой изменчивости и межгрупповой дифференциация признаков толщины мягких тканей лица у современного человека // Единство и многообразие человеческого рода. Ч.1. М., 1997. С.312—335.
12. *Веселовская Е.В., Балужева Т.С.* Новые разработки в антропологической реконструкции // Вестник антропологии. 2012. Вып.22. С.22—42.
13. *Balueva T., Veselovskaya E.* The appearance of ancient inhabitants of Hostice I za Hanou // *Drozdova E. et al.* Hostice I za Hanou. Brno, 2011. P.85—106.
14. *Веселовская Е.В., Абрамов А.С., Долгов А.А., Бобрецов И.В.* «Программа краниофациального соответствия» при проведении антропологических исследований и практический случай ее использования // Актуальные вопросы медико-криминалистической экспертизы: современное состояние и перспективы развития. Материалы науч.-практ. конф., посвященной 50-летию МКО БСМЭ Московской обл. М., 2013. С.116—123.
15. *Васильев С.В., Веселовская Е.В., Пестряков А.П.* Последний Инка // Вестник антропологии. 2014. Вып.26.
16. *Newman M.T.* The Sequence of Indian Physical Types in South America // *Papers on the Physical Anthropology of the American Indian.* 1949. №21. P. 69—97.
17. *Morant G.A.* A first study of the Tibetan skull // *Biometrika.* 1923. V.XIV. Part II—IV.
18. *Зубов А.А.* О физическом типе древнейшего населения Америки // Советская этнография. 1968. №4. С.118—122.
19. *Веселовская Е.В., Пестряков А.П., Кобылянский Е.Д.* Татьяна Сергеевна Балужева и российская школа антропологической реконструкции // Вестник Московского университета. Серия XXIII: Антропология. 2013. №4. С.29—41.

Небывалое бедствие в селе Кашкаранцы

А.А.Никонов,

доктор геолого-минералогических наук
Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН
Москва

В 2014 г. в «Природе» (№5. С.74–77) была опубликована интригующая статья В.Я.Евзерова «Ужасное событие, случившееся в 1888 году в селе Кашкаранцы». И по сообщаемому факту и по значимости вопроса о цунами в Белом море (учитывая современное значение этого внутреннего бассейна России на Европейском Севере) статья должна привлечь внимание читателей. Я же откликнуться на нее обязан, поскольку проблемой возникновения цунами во внутренних бассейнах Евразии, в том числе севера России, как и изучением сильных землетрясений, занимаюсь давно и профессионально.

Евзеров обнаружил и обнаружил первоисточник сведений, а именно, корреспонденцию из села Кашкаранцы, вышедшую спустя всего неделю после самого события в газете «Архангельские губернские ведомости»*. Это позволило положить все дальнейшее изложение на твердую фактическую основу. В работах по исторической сейсмичности и проявлениям цунами такое далеко не всегда осуществляется. Не повторяя опубликованного в «Природе» сообщения, выделим основные факты и сопоставим их с дополнительными признаками и моими соображениями. Феномен того заслуживает.

Документальная основа.

В одном пункте, на северном берегу Кандалакшского залива Белого моря, в местной небольшой бухте, ночью совершенно внезапно произошло мощное

и очень продолжительное надвигание ледяного припая на берег в полосе длиной 850 м и шириной около 65 м (Евзеров говорит о ширине 150 м). Ледяные торосы при высоте самого участка (полуострова) над уровнем высокого прилива всего 3.6 м вздыбились на 11–17 м (!). Указанная величина вызывает сомнение. Не вкралась ли здесь ошибка? В то время вместо метров вполне могли пользоваться аршинами.

Из 25–30 домов селения Кашкаранцы шесть были уничтожены вместе с имуществом, снесены 27 амбаров с припасами, сарай со снастями и час-

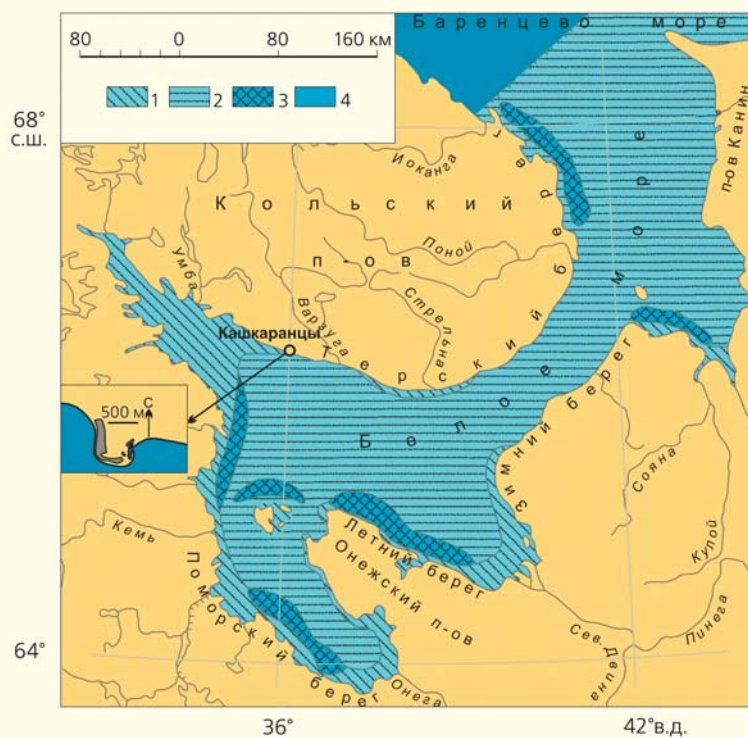


Схема строения ледяного покрова Белого моря зимой: 1 — припай, 2 — дрейфующие льды, 3 — полынья, 4 — чистая вода. На врезке показано расположение современного села Кашкаранцы (Природа. 2014. №5. С.76).

* Луговой М. Катастрофа в селе Кашкаранцах Кольского уезда // Архангельские губернские ведомости. Отдел неофициальный. 1888. №14. С.4–5.

тично со скотом и 11 бань. Потеряно 40 малых судов. Общий убыток превысил 4100 тогдашних рублей. Ничего подобного на берегах Белого моря ни раньше, ни потом никогда не отмечалось.

Сразу обратим внимание на «детали», опубликованные в 1888 г. и приведенные Евзеровым. В январскую ночь, в 4 часа, жители услышали (в деревянных рубленых избах!) шум, а затем сразу грохот, который был настолько сильным, что заставил их выбежать из домов, стоявших лишь на 3—4 м над ур.м. Люди в непосредственной близости увидели надвигающуюся ледяную стену всего за несколько минут до того, как громадное количество льда стало наваливаться на берег и крушить все на своем пути.

Исключительное событие у села Кашкаранцы вскоре получило отражение и в научной литературе (выписка в папке «Цунами» хранится мною несколько десятилетий). Эпизод включен и в обширную работу В.Фауссека [1, с.74—75], нередко цитируемую прежде, поскольку опубликована она в основном географическом издании того времени. Автор почти дословно пересказал сообщение Лугового со слов местных жителей, но само событие не анализировал. Важно, однако, что о случившемся узнал большой круг естествоиспытателей. Само собой разумеется, что напор льда тогда не соотносился с цунами даже в научных статьях, ибо если о цунами и знали, то никак не применительно к внутренним бассейнам России. Я впервые интерпретировал этот случай как проявление сильного цунами, но публикация осталась неостребованной [2].

Толкование и объяснение. Фауссек заключил отрывок о событии в Кашкаранцах словами: «Я привожу здесь этот случай как хорошую иллюстрацию той огромной механической силы, которой обладает прибрежный лед на Белом море под влиянием волнения и ветра» [1, с.75]. На указание очевидцев об отсутствии волнения и ветра автор, по видимому, не обратил внимания — настолько велико было у естествоиспытателей XIX в. убеждение, что других причин просто не существует. Можно вспомнить, что даже во второй половине XX в. крупнейший отечественный геолог Д.В.Наливкин «наводнение» на Соловецких о-вах в 1635 г. отнес за счет бури [3]. Однако о буре в данном случае не могло быть и речи, на что указывали прямые свидетельства о тихом ветре; внезапность, великая скорость и мощь нахлынувших водных масс и запретное, небывалое взгромождение ледовых торонов*. А вот при цунами зимой подобное известно. Например, на Камчатском п-ове в 1923 г. при очень сильном землетрясении и цунами в устье р.Камчатки, а также в Ревельской (Таллинской) бухте при слабом землетрясении 1869 года**.

* См. Никонов А.А. Древнее цунами на Соловецких островах // Природа. 2007. №9. С. 33—40.

** См. Никонов А.А. Цунами? В Ревеле? // Природа и свет. 2011. №7. С.64—66.

С моей точки зрения, трудно найти иное объяснение событию, кроме как признать его цунами. А «вероятная причина происшествия» — конечно же, землетрясение. Гул, переходящий в грохот, как известно сейсмологам, нередко ему предшествует и сопровождает. Вполне естественно принять такой сценарий и в данном случае. Однако аргументы в пользу землетрясения, строго говоря, не приводятся. В газетном сообщении говорится не о гуле, а о неожиданном, совершенно необычном для местных жителей «глухом шуме, который *перешел вдруг в грохот*». Такие звуки могло произвести движение мощного водного вала, а грохот возник уже при его накате на кромку ледяного прибрежного припая и крушении последнего. В этой ситуации принимать глухой шум, перешедший в грохот, за подземный гул от дальнего землетрясения нет достаточных оснований. Так что надежного свидетельства землетрясения мы в данном случае не имеем. Нужны независимые аргументы в пользу его возникновения и принятия за причину цунами.

Историческая аналогия. Одним из косвенных аргументов может послужить аналогия, причем не далекая, а всего примерно 50-летней давности. Речь идет о землетрясении в западной части Кандалакшского залива, зафиксированном 20 мая 1967 г. несколькими сейсмическими станциями и очевидцами [4—6]. Интенсивность сотрясения, эпицентр которого располагался под дном залива, составила V—VI баллов, а магнитуда (по уточненным данным) равнялась 4.1(±0.2). Колебания ощущались на довольно значительной площади, хотя событие относится к умеренно слабым. Тем не менее оно сопровождалось значительным цунами. Сохранилось сообщение очевидца: «Я услышал непродолжительный гул [вот и гул! — А.Н.] и принял его за звук низко летящего тяжелого самолета. После этого почти сразу раздалось два подземных толчка, один за другим... Весь дом содрогнулся... я слышал скрип, дребезжание стекол, звон посуды внутри дома [респондент находился на террасе. — А.Н.]... Толчки были ощутимы повсеместно, но более сильными они были, по рассказам, в поселках, ближе всего находившихся к Белому морю. На одном из островов Чупинского архипелага находился лесозавод Кереть. Так вот оттуда ребята рассказывали, что была во время толчков сильная волна на море, и большие тяжелые деревянные рыбацкие лодки повыбрасывало на берег»***.

Специальные обследования последствий в то время не проводились. Тем не менее описывается не что иное, как цунами, которое возникло, без сомнения, в результате землетрясения с эпицентром под дном Кандалакшского залива, всего в 30 км

*** Балаганский В.В. Что я знаю о землетрясении в Кандалакшском заливе в мае 1967. Памятная записка от 28 апреля 1988 г. (архив А.А.Никонова).

к северу от пос. Кереть [7]. В Чупской губе, открытой устьем в сторону эпицентра, волна обязательно должна была увеличить свою высоту и, возможно, скорость. Тяжелые лодки в указанном месте могли выбрасываться на берег при высоте волны не менее 1.5–2 м. Возникновение столь значительного (в благоприятных условиях) цунами в 30–35 км от эпицентра (где интенсивность едва могла превысить V баллов) весьма показательно. Этот пример может рассматриваться как своего рода эталон. Он с достаточной определенностью показывает реальность образования во внутренних водоемах цунами интенсивностью 2–3 балла (по 5-балльной шкале) не только при землетрясениях силой \geq VIII баллов, но и при толчках с эпицентральной интенсивностью даже V–VI.

Опыт детального анализа ситуации. В условиях ограниченной информации о самом событии особое значение приобретает анализ деталей сообщения, а также привлечение разнообразных природных сведений по району. Это касается и наземных, и подводных условий. Сосредоточимся на нескольких вопросах, обычно встающих при исследовании цунами, в том числе исторических.

В 1888 г. зимой в малом заливе у пос. Кашкаранцы на северном берегу Кандалакшского залива накат цунами поднял ледяной припай и набросил его на берег к самому селению. Напор на площадку высотой 3.6 м с нагромождением торосов до 11–17 м вызвал сдвиг, раздавливание, перемещение свободно лежавших на берегу карбасов по горизонтали до 60 м, разрушение бревенчатых бань, сараев, изб. В данном случае важно, что перемещение деревянных судов и построек льдом (при цунами!) произошло с преодолением уступа низкой (около 2 м над уровнем высшего прилива) террасы и выходом на следующую 3.6-метровую, обжитую и никогда не заливавшуюся. Возраст ее определяется как поздний голоцен (не менее 2–3 тыс. лет).

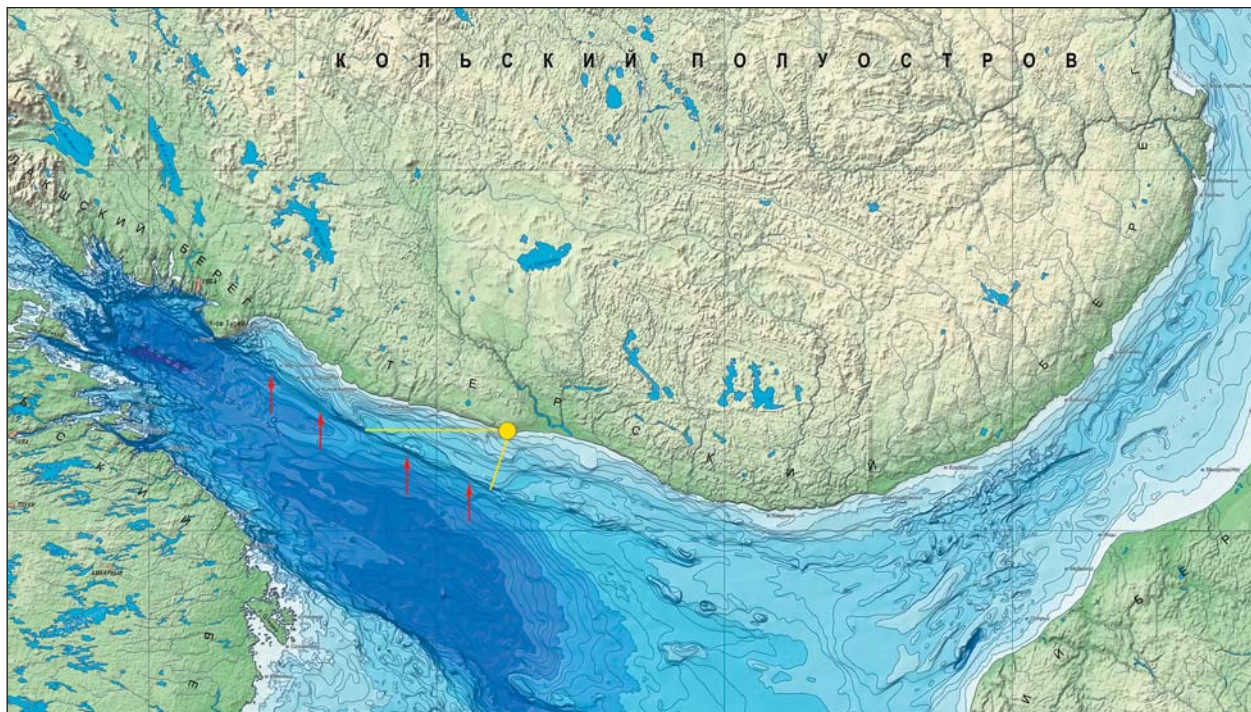
Для лучшего понимания эффектов возникшей в ту ночь чрезвычайной природной ситуации целесообразно обратиться к гидрографическому описанию небольшого мыса и обрамляющих его двух заливов: «Губы Кашкаранцы (Захребетная) и Червяная — это небольшие заливчики. Они обсыхают при отливе [высота прилива здесь обычно 2 м. — А.Н.], грунт в них каменистый, так что они не могут служить убежищем при береговых ветрах на полой воде» [7, с. 147–148]. На крупной топографической с батиметрией карте отчетливо выделяется полоса песчано-каменной осушки шириной 0.5 ± 0.1 км и далее от берега пологий (1.2°) подводный склон шириной 1–1.5 км с постепенным увеличением глубин от 2 до 20 м [8]. В таких условиях (при обычном ветровом нагоне даже во время прилива) движущийся с запада (вдоль местного берега) или с западо-юго-запада (под косым углом) водный вал со льдом задерживался бы на мелководье или на каменистом дне далеко от за-

ливчика в Кашкаранцах. Для того чтобы преодолеть (одним приступом) столь длинное мелководье, водная масса должна, во-первых, сильно возрасти в высоту, а во-вторых, увеличить скорость распространения. На однообразном на протяжении 10 км мелководье (глубиной 1–5 м) перед бухточкой Кашкаранцы так произойти не могло. Но такое возможно при накате цунами на берега.

Если бы волна двигалась с запада, вдоль северного берега Кандалакшского залива, ей пришлось бы непрерывно взламывать припай, т.е. все время создавать грохот. При этом она теряла бы мощность, и без того невеликую на сплошном мелководье. Сильный напор ледяных торосов на заселенную площадку в течение 3.5 ч (уже без грохота?) при отсутствии соответствующего ветра мог быть обусловлен только накатом нескольких (с промежутками) цунами.

Обратившись к батиметрической карте Кандалакшского залива и цифровой модели рельефа дна Белого моря [9], мы обнаруживаем, что к югу и западу вдоль северного берега тянется полоса с незначительными, всего несколько метров глубинами. Затем происходит постепенное углубление до 20–50 м в зоне шириной до 10 км. Наиболее выразительный рельеф дна — узкий (всего 2 км) крутой склон протяженностью около 80 км — наблюдается в 15–30 км от Кашкаранцев, между изобатами 100 и 150 м, в западо-северо-западном направлении от траверса села до п-ова Турий. И только в этой зоне прослеживается наиболее контрастное среднеквадратическое отклонение от общего уклона дна во всей северной части Кандалакшского залива. Несомненно, это линейный элемент, маркирующий северный, заведомо тектонический борт главного бассейна Кандалакшского грабена. Именно здесь мог находиться источник мощного водного возмущения (если, согласно классической модели океанских цунами, принимать вертикальные сейсмические подвижки на дне бассейна за их причину). Подводный разлом вдоль юго-западного борта основного бассейна Кандалакшского грабена располагается слишком далеко, чтобы считаться претендентом в выборе источника возможных сейсмических и водных аномалий.

Об очаге возмущений. Чтобы выяснить, где мог находиться очаг цунами (землетрясения?), уточним направление прихода ледяной стены. Местные жители указывали надвигание льда с северо-запада, то же повторил и Евзеров [10]. Но такое направление принять за действительное трудно, поскольку западнее поселения береговая линия на расстоянии не менее 10 км протягивается широтно, а северо-западнее лежит материк. Или автор газетной заметки 1888 г. спутал (западо-северо-запад с западо-юго-западом), или жители села не очень точно ориентировались, принимая местное направление таким же, как общее простираение северного Кандалакшского побере-



Фрагмент карты цифрового рельефа Белого моря [9] с местом наблюдавшегося события 5 января 1888 г. Желтым обозначен сектор вероятного прихода цунами. Стрелки показывают крупный подводный уступ (возможно, активный разлом).

жья. Возможно также, что за направление движения льда (водного вала) жители принимали направление «тихого северо-западного ветра», что, однако, никак не связано одно с другим. К селу Кашкаранцы волны могли подходить с запада или с западо-юго-запада. На этом направлении никаких препятствий для прямого распространения волн цунами нет. Контуры береговой линии, гипсометрия побережья (глубины ниже уровня воды, высоты надводья, наличие рельефной ловушки для воды со льдом), так же как и ориентация фронта волны относительно берега, — все это имеет первостепенное значение для распространения и параметрических характеристик цунами. В конкретной местной ситуации все условия были благоприятны для проявления цунами в заливе Кашкаранцы.

Остается вопрос, соотносить ли цунами в Кашкаранцах с землетрясением (серией толчков) или со спонтанным подводным оползнем? Вообще говоря, возможны оба варианта. Но есть аргументы в пользу одного из них. Прежде всего, долгий (3.5 ч) период надвига льда вынуждает предполагать длительное действие причины. Малый оползень (от слабого землетрясения) не мог вызвать столь мощного напора воды со льдом на берег. При отсутствии ветра событие предпочтительнее расценивать как следствие серии толчков, нежели серии спонтанных подводных оползней.

Таким образом, намечаются геоморфологические (а по существу, тектонические) предпосыл-

ки, чтобы признать причиной водного возмущения землетрясение. В пользу такого решения склоняет и длительность водных возмущений, поскольку она позволяет допустить несколько сейсмических событий в очаге (нескольких фаз разрывообразования на дне), т.е. серии толчков (или афтершоков).

О сильных землетрясениях в Кандалакшском заливе. Прямым подтверждением существования очагов мощных землетрясений с образованием крупных разрывов и смещений в скальных породах (сейсмодислокаций) в Кандалакшском заливе служат недавние исследования А.В.Мараханов и Ф.А.Романенко зафиксировали свежие сейсморазрывы, уходящие под воду на островах, в западной части залива, в районе шхер [11]. Они также определили возраст последних крупных сейсмических событий с эпицентрами вблизи о.Великий и пролива Великая Салма — 500 и 1800 лет назад соответственно. Структурно-тектоническая основа для локализации очагов сильных землетрясений в акватории Белого моря теперь, с использованием цифровой модели рельефа дна, открывает перспективы собственно сейсмотектонических исследований [9, 12].

Нельзя пройти мимо и недавно обнаруженных в шхерах на дне Кандалакшского залива фактов. С помощью высокоразрешающих геофизических методов в нескольких пунктах выявлены так называемые гравититы, т.е. подводные оползни, в том числе и мощные серийные [13]. Ряд признаков до-

статочно уверенно связывается с местными землетрясениями, тем более что на том же участке установлены недавние сильные события и другими независимыми исследователями [11].

Некоторые обобщения. Итак, при имеющемся объеме знаний приходим к наиболее вероятному заключению: водное возмущение в Кашкаранцах в 1888 г. могло быть порождено подводным оползнем. Но если даже это и так, то первичной причиной все же оправдано считать землетрясение.

О распространении цунами вдоль северного берега, так же, как и о сотрясениях вдоль него, сведений не появилось. Поэтому наши соображения вынужденно ограничиваются только мысом с поселением и малой, открытой к западо-юго-западу бухтой. Как мы уже уточняли, Евзеров считает высоту цунами (в бухте) около 3.6 м (высота застроенной площадки). Эта величина, видимо, близка к действительности, но приниматься она, скорее всего, должна с вероятностью ошибки, равной половине значения (± 1.8 м). Для оценки неточности определения необходимо учитывать две особенности события.

Во-первых, поскольку напор льда в целом продолжался 3.5 ч, необходимо допустить, что за такой промежуток времени возникло не одно цунами, а несколько. Однако оценивать можно только наивысшую волну, а ею вовсе не обяза-

тельно была первая. Если так, то и высокие торосы, образовавшиеся во второй половине временного интервала, могли стать преградой для последующих волн, даже если они были выше жилой площадки. Во-вторых, напор льда выше уровня прилива, с самого начала дошедший до судов на берегу, бань и сараев с рыболовными снастями, нельзя не признать аргументом в пользу высоты первой волны не менее 2 м над уровнем максимального прилива.

Ныне мы знаем на Белом море помимо цунами 1888 и 1967 гг. еще несколько даже более мощных исторических цунами в 1627 и 1635 гг. Статью 2008 г. (когда еще не были известны все приведенные данные по специальным исследованиям сейсмодетформаций и палеоземлетрясений) я закончил следующими словами: «Судя по расположению эпицентров и силе землетрясений 1542, 1627 и 1911 гг., они могли породить сильные цунами на берегах Белого моря... Так или иначе, есть основания полагать, что цунами высотой 1—3 м могут на беломорских берегах возникать не реже одного раза в 100—200 лет. И с этим природным явлением теперь необходимо считаться» [2]. Ныне этот вывод получает значимые подкрепления. Пора начинать исследования палеоцунами на берегах Белого моря. На этом пути нас ожидают важнейшие открытия, новые геодинамические и сейсмологические решения. ■

Литература

1. Фауссек В. Материалы к вопросу об отрицательном движении берега в Белом море и на Мурманском берегу // Зап. Императорского Русского географического общества по общей географии. Т. XXV. № 1. СПб., 1891. С. 1—96.
2. Никонов А.А. Землетрясения и цунами в Беломорском бассейне // Всероссийская конференция с международным участием «Северные территории России: проблемы и перспективы развития», 23—26 июня 2008 г. Материалы конференции. Архангельск, 2008. CD-ROM.
3. Наливкин Д.В. Ураганы, бури, смерчи. Л., 1969.
4. Никонов А.А. Макросейсмическая характеристика землетрясений XX века в восточной части Балтийского щита // Белорусский сейсмологический бюллетень. Минск, 1992. С. 96—144.
5. Никонов А.А. Исторические землетрясения // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск, 2004. С. 192—213.
6. Чепкунас Л.С., Павлова Н.Д. Об определении магнитуд сильных землетрясений Кольского полуострова по аналоговым сейсмограммам // Шестая международная школа по сейсмологии. Апатиты, 2011. С. 365—369.
7. Рейнке М. Гидрографическое описание Северного берега России. Ч. I. Белое море. СПб., 1883.
8. Горшкова Т.И. Осадки Белого моря. М.; Л., 1937.
9. Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В. Цифровая модель рельефа дна Белого моря // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 3. С. 86—92.
10. Евзеров В.Я. Цунами в Белом море (о событии 5 января 1888 года) // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2013. С. 181—183.
11. Мараханов А.В., Романенко Ф.А. Новые данные о послеледниковых сейсмодислокациях Северной Карелии (Карельский берег Белого моря) // Юдахинские чтения. Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI веке. Матер. доклад. Всеросс. конференция. Архангельск, 2014. С. 137—140. CD-ROM.
12. Никонов А.А., Фроль В.В., Шварев С.В. Землетрясения в Беломорском бассейне в соотношении с неотектоникой и особенностями рельефа // Геология морей и океанов. Матер. XX Междунаучной конфер. (школы) по морской геологии. М., 2013. Т. V. С. 204—208.
13. Рыбалко А.Е., Федорова Н.К., Никитин М.А., Токарев М.Ю. Геодинамические процессы в Кандалакшском заливе Белого моря и их роль в формировании покрова современных осадков // Матер. XX Междунаучной конфер. (школы) по морской геологии. М., 2013. Т. III. С. 237—241.

Всплеск метеорного потока кометы 209P (LINEAR) в 2014 году

М.П.Маслов,

кандидат экономических наук

Новосибирский государственный технический университет

Научные сообщения
Всплеск активности нового метеорного потока, связанного с кометой 209P (LINEAR), состоялся над Северо-Американским континентом 24 мая 2014 г. Максимальный уровень ZHR (Zenithal Hourly Rate, зенитное часовое число — характеристика активности метеорного потока), по данным Международной метеорной организации (IMO), составил около 15 метеоров со временем максимума около 7—8 UT [1]. Метеорная активность из радианта потока уверенно фиксиро-

валась и канадским радаром CMOR. Таким образом, можно говорить о невысокой, но надежно регистрируемой независимыми методами наблюдений активности потока.

Данный всплеск прогнозировался несколькими исследователями [2—5]. Прогнозы базировались на расчетах орбитальной эволюции метеорных частиц, выброшенных в прошлом кометой 209P (LINEAR). Эта комета — околоземная, а элементы ее орбиты в период с 1903 по 2009 г., по данным К.Киношита [5] и моим собственным расчетам, приводятся в таблице.

© Маслов М.П., 2015

Таблица

Элементы орбиты кометы 209P [6, с дополнениями]

Момент перигелия	Перигелийное расстояние, а.е.	Эксцентриситет	Наклонение, град	MOID*	MOID, а.е.**
1903.12.20.43224	0.8729084	0.7033061	15.28879	31.12.1903 20:03	-0.03283
1909.01.08.68472	0.8813397	0.7012509	15.29548	08.02.1909 15:07	-0.02756
1914.02.05.16618	0.8828692	0.7008280	15.30628	07.03.1914 23:48	-0.02699
1919.03.01.01392	0.8766269	0.7002251	17.61488	29.03.1919 16:51	-0.05042
1924.02.29.59432	0.8737383	0.7009886	17.63786	09.03.1924 8:23	-0.05303
1929.02.26.04589	0.8746183	0.7007899	17.63642	06.03.1929 18:48	-0.0522
1934.02.22.89178	0.8720107	0.7014265	17.65129	03.03.1934 17:36	-0.05419
1939.02.21.50675	0.8751873	0.7006002	17.64257	02.03.1939 5:07	-0.05181
1944.03.01.98758	0.8964031	0.6951483	17.71057	29.03.1944 12:51	-0.03749
1949.03.19.07834	0.8962652	0.6951438	17.72076	05.04.1949 14:03	-0.03794
1954.03.27.45226	0.8687807	0.7016049	18.08087	04.04.1954 12:46	-0.06325
1959.03.15.09877	0.8655908	0.7024053	18.10445	02.04.1959 6:20	-0.06603
1964.02.29.09283	0.8688019	0.7016012	18.08796	08.03.1964 3:56	-0.06328
1969.02.14.67854	0.8679274	0.7018265	18.09930	04.03.1969 18:50	-0.06394
1974.02.05.07367	0.8713271	0.7008938	18.09369	05.03.1974 0:24	-0.0615
1979.02.09.02643	0.9158329	0.6886661	19.06952	05.03.1979 13:52	-0.0354
1984.02.26.56878	0.9141877	0.6890743	19.08857	02.03.1984 2:44	-0.03717
1989.03.09.55954	0.9079263	0.6905477	19.14150	03.04.1989 6:18	-0.04282
1994.03.17.16793	0.9043433	0.6914232	19.16513	31.03.1994 23:25	-0.04597
1999.03.24.71781	0.9077092	0.6906005	19.15169	29.03.1999 10:03	-0.04305
2004.04.02.16333	0.9121801	0.6894032	19.14733	26.04.2004 17:00	-0.03926
2009.04.15.97437	0.9137062	0.6889779	19.14792	30.04.2009 10:13	-0.0382
2014.05.06.32419	0.9694580	0.6725839	21.24342	27.05.2014 11:44	+0.00295

* MOID — момент прохождения кометой минимального расстояния до земной орбиты.

** Минус перед значением MOID показывает, что точка на орбите кометы лежит внутри орбиты Земли (ближе к Солнцу), а плюс — снаружи земной орбиты (дальше от Солнца).

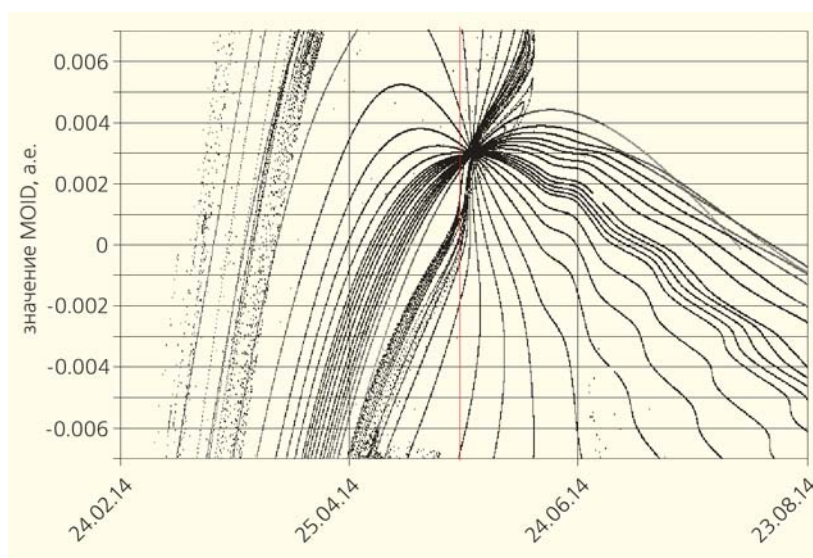
В указанный период комета находилась на расстоянии всего 0.02–0.07 а.е. от земной орбиты. 209P периодически сближается с Землей и Юпитером, причем последнее время от времени несколько меняет ее орбиту. Последнее такое сближение с Юпитером (до 0.59 а.е.) состоялось 18 февраля 2012 г. В результате орбита кометы оказалась крайне близкой и к земной (в 0.0029 а.е.). Это создало благоприятные условия для столкновения Земли с пылевым материалом 209P.

Данный случай не остался без внимания астрономов. Они провели необходимые расчеты и предсказали метеорную активность от потока этой кометы в 2014 г. Имеющиеся прогнозы совпадали в том, что вокруг 7:00–7:30 UT 24 мая 2014 г. Земля пройдет вблизи целого ряда пылевых шлейфов 209P, выброшенных в XVIII–XIX вв., а возможно даже и раньше [5]. Картина распределения пылевых шлейфов кометы в окрестностях орбиты Земли в 2014 г. показана на рисунке.

По результатам расчетов мой прогноз выглядел следующим образом:

«В 2014 г. ожидается сближение Земли с большим количеством пылевого материала кометы 209P. Основным источником активности станут шлейфы 1898–1919 гг., но возможна активность и от более ранних, вплоть до шлейфа 1763 г. Именно с него начинали производиться расчеты, по которым максимальная активность ожидается 24 мая 2014 г. в 7:21 UT, теоретический радиант RA = 122.8°, Dec = +79.0°. Однако оценка активности сильно затруднена из-за отсутствия наблюдений за прошлыми всплесками, а также из-за малых размеров самой кометы и неизвестной активности ее ядра в прошлом. Тем не менее, учитывая высокую плотность и очень большое количество шлейфов, можно приблизительно оценить пиковое ZHR в 100 метеоров. Это крайне осторожная оценка. Более чем вероятно, что реальная активность окажется намного выше, в том числе вполне возможны и ее штормовые значения» [4].

Во всех прогнозах самой большой неопределенностью оставалась интенсивность ожидаемого всплеска, которая зависит от ряда параметров. Но большинство из них поддаются достаточно точному расчету. Например, такие параметры шлейфа, как возраст (сколько лет прошло с момента соответствующего возвращения родительской кометы); расстояние между его центральной



Пространственно-временная проекция шлейфов потока 209P на околоземную орбиту в 2014 г. (при минимальном расстоянии прохождения от нее частиц потока). По оси x отложен отрезок времени от марта до сентября 2014 г., по оси y — значение MOID (а.е.) для частиц, составляющих пылевые шлейфы.

осью и Землей; относительная продольная плотность (насколько он более или менее плотный, чем некий эталонный шлейф), а также скорость вхождения метеоров потока в атмосферу Земли и скорость выброса из ядра кометы частиц, сталкивающихся с Землей.

В то же время абсолютная продольная плотность шлейфа расчету не поддается. Она зависит от реальной интенсивности выброса метеорных частиц ядром родительской кометы. Или, более детально: от размеров ядра кометы; доли активных участков поверхности ядра, с которых происходит истечение вещества в космос; доли тугоплавких веществ в составе ядра, формирующих пыль и крупные обломки, которые после выброса из ядра не покидают орбиту вследствие радиационного давления Солнца, как это происходит с выбрасываемыми газами; перигелийного расстояния орбиты родительской кометы; постепенного истощения и падения кометной активности ядра родительской кометы с каждым обращением вокруг Солнца; иных случайных факторов, таких как распад ядра родительской кометы, столкновение с иными малыми телами и др.

По прямым наблюдениям для абсолютной продольной плотности шлейфов более или менее точно можно оценить только перигелийное расстояние орбиты родительской кометы. И потому при метеорном моделировании трудно понять, насколько больше или меньше метеорного материала та или иная комета выбросила в данном возвращении. А из-за этого в конечном итоге обычно невозможно точно оценить и ожидаемую метеорную активность.

В случае с известными метеорными потоками существуют способы более или менее точного установления величины абсолютной продольной плотности для типичного шлейфа соответствующей родительской кометы. Здесь используются: ретроспективный расчет случаев активности потока в прошлом; сопоставление расчетной интенсивности этих всплесков, выдаваемой прогностической моделью, с реально наблюдавшимся уровнем активности; корректировка параметров прогностической функции ZHR. Это называется калибровкой прогностической модели, и она показывает, насколько важны метеорные наблюдения для более точного прогнозирования метеорной активности. Откалиброванные по реальным данным наблюдений модели позволяют делать весьма точные прогнозы интенсивности всплесков для такого потока, как Леониды. Ошибка обычно составляет не более 2–3 раз, что для таких прогнозов совсем немного. Леониды — наиболее изученный в этом отношении поток. Менее точные прогностические модели существуют для Драконид, Персеид, Июньских Ботид, Урсид и др.

В то же время, если речь идет о новом, ранее не наблюдавшемся потоке (как это было в случае с потоком кометы 209P), то данные о прошлых наблюдениях по определению отсутствуют. В прогнозе интенсивности всплеска не на что опираться, и нельзя провести калибровку прогностической модели. Комета 209P открыта совсем недавно, в 2004 г. На текущий момент она очень маленькая и слабоактивная, с абсолютной величиной ядра $m_1 = 18.0$. Разумеется, нет никакой информации о ее активности в XVIII—XIX вв., когда она выбрасывала шлейфы, столкнувшись с Землей в 2014 г. Вполне возможно, что в то время она была крупнее и активно выбрасывала вещество, а может, она уже и тогда оставалась небольшой или вовсе была «спящей», с летучими веществами под тугоплавкой коркой на поверхности. Однажды эта корка должна была разрушиться вследствие внешних воздействий, 209P стала проявлять кометную активность, и тогда-то ее открыли. В случае правильности первого предположения 24 мая следовало ожидать существенную метеорную активность, во втором слу-

чае — небольшой всплеск, а в третьем — полное отсутствие активности.

Ценность метеорных прогнозов (даже если затруднено определение интенсивности всплеска) состоит в том, что они с высокой точностью определяют время, когда может произойти что-то необычное (что бы это ни было). В случае большого размера кометы в прошлом мог произойти очень мощный всплеск активности ее потока. Кроме того, тогда можно было бы в принципе подтвердить или опровергнуть наличие реальных пылевых шлейфов у 209P, выброшенных за последние 200–300 лет, и провести первую калибровку модели прогнозирования интенсивности. Неудивительно, что всплеск 24 мая 2014 г. представлял большой интерес как в теоретическом, так и в практическом отношении. Он привлек пристальное внимание астрономической общест-венности, и ожидаемое время всплеска оказалось достаточно плотно «закрыто» наблюдениями (в основном в Северной Америке, где сложились для них благоприятные условия).

Как мы знаем из отчета IMO, реализовался второй сценарий — поток дал небольшой, но не вызывающий никаких сомнений всплеск активности вокруг предполагаемого времени. Из этого, во-первых, можно сделать вывод об успешном теоретическом предсказании ранее не наблюдавшегося потока. Без данных прогнозов наблюдатели, скорее всего, пропустили бы этот кратковременный и не очень интенсивный метеорный всплеск. Во-вторых, можно более-менее точно утверждать, что комета 209P и в XVIII—XIX вв. оставалась такой же маленькой, как и сегодня, с небольшой, но бесспорной метеорной активностью. И в-третьих, результаты наблюдений в 2014 г. позволили существенно уточнить прогнозируемую интенсивность следующего вероятного всплеска активности кометы 209P, который, по моим расчетам, может случиться 24 мая 2019 г. в 7:44 UT. Его ZHR ожидается на уровне 10–15 метеоров.

В заключение хочется отметить, что с 2014 г. началось создание Новосибирского сегмента сети наблюдений за метеорной активностью. Эта работа поддержана небольшим грантом мэрии г.Новосибирска. ■

Литература

1. Camelopardalids 2014: visual data quicklook // <http://imo.net/live/cameleopardalids2014>.
2. Jenniskens P. Meteor showers and their parent comets. Cambridge, 2006.
3. Vaubaillon J. The next big meteor shower // http://www.imcce.fr/langues/en/ephemerides/phenomenes/meteor/DATABASE/209_LINEAR/2014/index.php?char=year&body=Earth&year=2014&shower=209_LINEAR.
4. Ye Q., Wiegert P. Will Comet 209P/LINEAR Generate the next meteor storm? // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2013. November. P.1–6.
5. Маслов М.П. 209P-иды 2014 — прогноз активности // <http://feraj.narod.ru/Radiants/Predictions/209p-ids2014.html>.
6. Kinoshita K. 209P detail // <http://www9.ocn.ne.jp/~comet/pcmtn/209p.html>.

Урочище Жаманаркаш — объект природного наследия

В.М.Павлейчик,
кандидат географических наук
Институт степи УрО РАН
Оренбург

Одна из актуальных задач природоохранной деятельности — выявление и сохранение объектов геологического наследия. В этом отношении особый научный и познавательный интерес вызывает Уральская горная страна. Ее сложная геологическая история отражена в разнообразии слагающих пород и минералов, а также в уникальных формах рельефа — останцах выветривания, скалах, многочисленных пещерах. На Урале широко распространены минеральные водные источники, вблизи которых развиваются лечебно-курортные зоны. Здесь находятся важнейшие геологические разрезы, послужившие основой для становления и развития отечественной геологической науки. К настоящему времени остались свидетельства освоения минеральных ресурсов с древнейших времен — уникальные образцы историко-культурного наследия в виде горных выработок, заводов и др. Многие из этих геологических достопримечательностей активно посещаются туристами и стали составной частью национального природного наследия.

Но длительная история добычи минеральных ресурсов Урала — серьезная угроза для сохранности многих геологических объектов. В связи с этим учреждения Уральского отделения РАН — Институт степи, Горный институт, Институт геологии Коми НЦ и Институт минералогии — ведут работы над темой «Геологическое и геоморфологическое наследие Урала и Приуралья: проблемы сохранения в условиях недропользования».

Результаты реализации этого «общеуральского» проекта были бы неполными без рассмотрения естественного продолжения Урала в виде хребта Мугоджары (казах. Мугалжар) и прилегающих к нему геологических структур в пределах Актыюбинской обл. Республики Казахстан. Поэтому в 2013 г. при информационной поддержке геологических научно-производственных организаций ТОО «АктыюбНИГРИ» и ОАО «ЗапРудГеология» — инициаторов сохранения геологического наследия региона — в Актыюбинскую обл. была организована экспедиция, в которой обследованы наиболее значимые из объектов геологического насле-

дия, оценены их современное состояние, возможные угрозы и перспективы экскурсионного использования.

В перечень геологических достопримечательностей Актыюбинской обл. включены 19 геологических, геоморфологических и гидрогеологических объектов (что составляет чуть менее 10% от общего количества геологических памятников природы Республики Казахстан). Некоторые из них имеют мировое значение, в их числе — глобальный стратотип границы каменноугольной и пермской систем «Долина реки Айдарлыаша». Необходимость сохранения объектов геологического наследия очевидна, это подтверждается как научными исследованиями, так и документами правительства Республики Казахстан [1, 2].

Помимо уже признанных геологических памятников природы республиканского значения, получения официального статуса в настоящее время ожидают еще 14 объектов геологического наследия Актыюбинской обл. К сожалению, механизм придания природоохранного статуса геологическим объектам не обходится без трудностей. Одна из них — сложный и длительный процесс оформления необходимой документации. Это приводит к тому, что многие уже признанные объекты природного наследия пока не отражены в схемах территориального планирования (землепользования), не поставлены на кадастровый учет, на них не оформлены паспорта и охранные обязательства. Это может повлечь за собой потерю ценности или целостности природных объектов. Так, в результате добычи полезных ископаемых частично разрушены древний вулкан Алабас («Шуылдакский палеовулканический район»), оригинальный карстовый ландшафт и самые южные гипсовые пещеры Предуралья, ценный в стратиграфическом и палеонтологическом отношении древний риф («Водорослевые рифовые известняки нижнепермского возраста Актастинского рифа»).

Перечень уникальных геологических достопримечательностей, нуждающихся в охране, далеко не полон. Регион хорошо исследован в геологическом отношении, но все же на сегодняшний день известны и достойно оценены еще не все объекты.

В ходе проведенной экспедиции был обнаружен удивительный природный комплекс, отмеченный на топографических картах как урочище Жаманаркаш. Именно о нем хотелось бы рассказать подробно, учитывая, что до описания нашей экспедицией это место не упоминалось ни в научной, ни в краеведческой литературе. При этом оно, по мнению участников исследований, по праву достойно детального изучения и сохранения в ряду других особо охраняемых природных территорий Актюбинской обл.

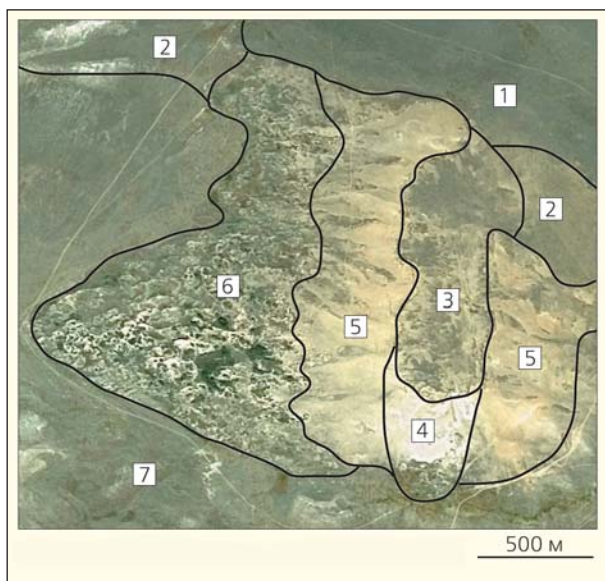
Название Жаманаркаш происходит от казахских слов *жаман* — «плохой, дурной», и *уркеш* — «горб верблюда». Урочище расположено в центральном Примугоджарье на правом берегу р. Ушкоттысай (левого притока р. Эмба), в 25 км к юго-востоку от г. Эмба. Площадь урочища всего около 2,5 км², оно занимает наиболее возвышенную часть (363 м) асимметричного междуречья р. Ушкоттысай и балки Утесай и представляет собой увал, вытянутый в меридиональном направлении.

В состав этого сложного урочища входят несколько подурочищ. Наиболее высокие участки гряды покрыты многочисленными глыбами кварцитопесчаников, относящимися, согласно схеме геологического строения региона, к верхам казахской свиты эоцена [1]. Генетически эти поро-

ды — пластовые конкреции, образованные путем цементации песка преимущественно кремнеземом. В плотных породах отмечаются прослойки с довольно интенсивной охристо-желтой и красновато-бурой окраской, что позволяет говорить о частичной цементации окислами железа. Именно локальное окремнение и ожелезнение этих верхних слоев стало причиной возвышенного положения гряды в рельефе.

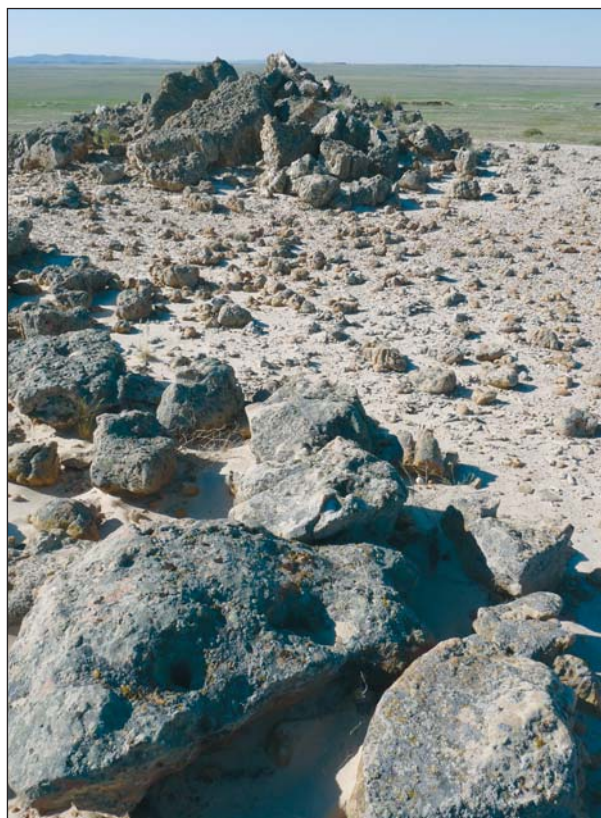
На участках, где кварцитопесчаники подвергаются активному выветриванию, отчетливо заметна склоновая сортировка разрушаемых пород. Высокие части увала заняты развалами крупных (до 2,5—3,5 м и более) глыб и плит. На удалении обычны мелкоглыбовые и щебнистые россыпи на кварцевых песках, которые унаследовали окраску — от светло-бурой до белесой — от разрушающихся пород. Помимо обломочного материала на поверхности наблюдаются россыпи галек преимущественно кварцевого состава различной степени окатанности. По-видимому, это «спроецированные» остатки отложений более молодых галечников кызылтобинской свиты.

Особенно интересны одиночные останцы кварцитопесчаников необычного облика. Их высота до 2,0—2,5 м, а форма — правильная концентрическая, либо сложная причудливая — отражает



Урочище Жаманаркаш. Условные обозначения: 1 — пологий приводораздельный склон северной экспозиции; 2 — покатый денудационный склон (уступ); 3 — вершина и склоны увала, сложенные коренными кварцитопесчаниками; 4 — эродированное окончание гряды с денудационно-останцовыми «развалами» кварцитопесчаников; 5 — кора выветривания с эрозионными останцами, песками и кремнистыми стяжениями; 6 — песчано-эоловый массив, покрытый древесно-кустарниковой растительностью; 7 — пологий задернованный придолинный склон.

Космический снимок GoogleEarth



«Развалы» плотных ожелезненных кварцитопесчаников в верхних частях склонов увала.

Здесь и далее фото автора



Останцы выветривания.

литологическую неоднородность пород и их разную устойчивость к процессам выветривания. На отдельных останцах можно наблюдать крупные и мелкие ячеи, борозды, расширенные трещины. Наиболее выветрелые участки имеют гроздевидную поверхность.

При дальнейшем разрушении образуются зоны, покрытые продуктами выветривания — в основном шарообразными обломками диаметром 1–3 см, реже — веретенообразными и кораллоподобными отдельностями. Судя по характеру форм, их можно отнести к стяжениям (конкрециям), но генезис подобных образований пока неясен. Они также представляют несомненный научный и познавательный интерес.

Средние и нижние части склонов увала сложены исключительно белыми кварцевыми песками. По преобладанию геодинамических процессов и, следовательно, особенностям морфоструктуры на склоне западной экспозиции выделяются две зоны. Верхняя практически не закреплена растительностью и представляет собой полого-покатую поверхность, расчлененную неглубокими ложбинами. Ниже по склону пески подвержены эоловой переработке, а рельеф меняется на дюно-котловинный ячеистый с характерными денудационными и аккумулятивными формами. Дюны здесь представляют собой возвышения разной морфологии, но без явно выраженной серповид-



Продукты выветривания в виде стяжений (конкреций) разных форм.



Песчано-эоловая зона урочища Жаманаркаш.

ности (типичной для активно развеваемых участков). Они возвышаются в среднем на 3–7 м над смежными котловинами выдувания — наиболее динамичными элементами геосистемы, если судить по практически полному отсутствию на них растительного покрова.

Как и многие другие песчаные массивы Актюбинской обл., эта территория ранее подвергалась интенсивной пастбищной нагрузке, что и привело к формированию развеваемых песков. Косвенно на это указывают остатки животноводческого хозяйства, расположенные поблизости. Теперь же, после прекращения выпаса, урочище Жаманаркаш остается довольно стабильным природным образованием. Отдельные участки рельефа зарастают березово-ивовым редколесьем. Очевидно, что древесно-кустарниковому и травянистому покрову здесь принадлежит особая роль — он защищает пески от дальнейшей дефляции.

Песчано-эоловый рельеф занимает довольно существенный высотный диапазон — до 34 м. В верхней и нижней частях склона эоловые проявления сходят на нет по мере сокращения объемов песчаной толщи. В подошве склона гряды, плавно переходящего в придолинно-речной склон, песчаные накопления постепенно сменяются плотными глинистыми породами.

Таким образом, в урочище Жаманаркаш на небольшой площади можно наблюдать влияние сложного литологического субстрата на структу-

ру ландшафта. В результате «бронирующей» роли твердых пород здесь возникают останцовые возвышенности и сохраняются от размыва нижележащие пески.

Стоит сказать, что такая картина наблюдается и в некоторых других районах Примугоджарья — к примеру, в небольшом урочище Кундузды, занимающем останец высотой 350 м на правом берегу одноименной реки (притока Эмбы). Большую известность получило и урочище Уркач (Оркаш) на междуречье Эмбы, Темира и Ори — перспективный природный заказник площадью более 30 тыс. га [3–6]. Формирование этого обширного песчаного массива также связано с разрушением кварцито-песчаников и образованием останцов и обширных полей выветривания, усеянных обломками коренных пород разной размерности. Плотные породы здесь выступают в качестве водоупора, в результате создаются условия повышенного грунтового увлажнения. Поэтому кроме березовых колков, обычных для многих песчаных массивов, здесь в низинах появляются локальные осоковые и сфагновые болота. Именно в этих реликтовых экотопах встречаются редчайшие для полупустынной зоны растения значительно более северных местообитаний (сфагнумы скрученный, гладкий и центральный, роснянка круглолистная, ятрышник шлемовидный, шпажник черепитчатый и др.).

Урочище Жаманаркаш кроме геологической и ландшафтной ценности также несомненно име-



Плитообразные фрагменты коренных пород.

ет высокое эколого-биологическое значение, которое в дальнейшем следует оценить специалистам. Участники экспедиции зафиксировали гнездование хищных птиц (степного орла, чернолоблого сорокопута и др.), а также локальную популяцию ящерицы круглоголовки.

Следует заметить, что отсутствие общедоступной информации об урочище Жаманаркаш во многом способствовало сохранению этого удивительного природного объекта. Сегодня здесь нет следов пребывания человека. Но различные виды природопользования, в числе которых и туризм, могут представлять значительную опасность для целост-

ности урочища. Так, близость трасс — железнодорожной и автомобильной — делает этот объект потенциальным источником добычи песка. Поэтому, если будет положительное заключение о перспективности территории в качестве особо охраняемой, первым шагом должно стать резервирование земель под природоохранные цели. А для организации туризма здесь необходимо выделение специальных туристических троп, чтобы желающие могли увидеть своими глазами редкое ландшафтное и литологическое разнообразие урочища Жаманаркаш, не нанеся вреда хрупкому природному равновесию этого уникального места. ■

Литература

1. Коробков В.Ф., Баймагамбетов Б.К., Сапожников П.К., Улукпанов К.Т. Путеводитель геологических экскурсий по Мугалжарам, Восточному Прикаспию и Актюбинскому Приуралью. Актюбе, 2012.
2. Постановление Правительства Республики Казахстан №1212 от 18 ноября 2010 года «Об утверждении перечня геологических, геоморфологических и гидрогеологических объектов государственного природно-заповедного фонда республиканского и международного значения, Правил их ограниченного хозяйственного использования на особо охраняемых природных территориях, а также перечня участков недр, представляющих особую экологическую, научную, культурную и иную ценность, отнесенных к категории особо охраняемых природных территорий республиканского значения» // Казахстанская правда. 7 января 2011 г.
3. Гаяль А.Г. Облесение бугристых песков засушливых областей. М., 1952.
4. Назарчук М.К., Назарчук Л.Н. Проектирование сети ООПТ Актюбинской области // Степной бюллетень. 2010. №30. С.10—15.
5. Русанов Ф.Н. Сфагновое болото в окрестностях Мугоджар // Природа. 1948. №9. С.66.
6. Чибилев А.А. Урал: природное разнообразие и евро-азиатская граница. Екатеринбург, 2011.

Оживший камень

В.В.Щербаков, Е.В.Чернова

Не так давно в краеведческом музее г.Таруса (Калужская обл.) прошла выставка «Оживший камень». Таруса — город небольшой, провинциальный, но при этом творческий, «русский Барбизон», как его называют художники и поэты. Музеев около 10, постоянно проводятся концерты известных звезд, различные выставки. Показать в очередной раз камень просили и работники музея, и общественность города.

На этот раз выставку организовывали не профессиональные геологи и минералоги, а любители камня. Отбор был очень простой: каждый желающий приносит хотя бы один оригинальный образец — минерал, кусок горной породы или изделие из них.

Участниками выставки стали: владелец Геолого-минералогического музея г.Серпухова, страстный коллекционер, собравший уже около 40 тыс. образцов, — В.Р.Кирницкий; двое любителей из

Москвы — П.П.Федоров и Е.В.Чернова и тарусяне — Т.М. и В.В.Щербаковы, С.Г.Батуев, А.И.Сипаткин, В.Н.Кузин, Л.А. и Э.И.Рожавские. Перед открытием еще несколько изделий добавили Калужский областной и Тарусский краеведческий музеи.

Концепция выставки и ее название в процессе подготовки менялись несколько раз. В итоге родился «Оживший камень»: были показаны изделия и несколько образцов камня, которых все же коснулась рука художника.

Экспозиция заняла весь зал и расположилась на стенах, в пяти шкафах и восьми витринах. Что же увидели гости выставки? Прежде всего — разнообразие минералов: малахит, яшма, лазурит, агаты, оникс, агальматолит, перламутр и др. Много было картин из камня, выполненных в различной технике. Большинство из них просто срезы — пластины камня в различных рамах, размером с открытку, в которых каждый видел то, что подсказывало его воображение. Многие картины напоминали пейзажи. Экспонировались и довольно



Девушка.
Песчаник.



Божество.
Агальматолит.

«Девушка», песчаник, Индонезия (слева) и «Божество», агальматолит, Камбоджа.

Здесь и далее (за исключением специально отмеченных) фото Е.В.Черновой



Каминные часы из яшмы и пейзаж «Ледоход», орская яшма, Урал.

большие срезы агатов с композицией из каменных цветов и листьев.

Калужский музей представил несколько фотографий изделий из камня, сделанных различными мастерами. Мы обращали внимание посетителей на фотографии великолепных фигурок, выполненных В.В.Коноваленко в 1960—1990 гг. Он первым в СССР стал последователем известного мастера А.К.Денисова-Уральского и камнерезов из фирмы Фаберже. На выставке были показаны две фотографии композиции «Бражники» — три мужика навеселе, в руках которых объемные кружки и бадья. Первый вариант этой троицы сделан в 1953 г., а второй — в конце столетия, когда мастер уже жил в США.

Большое место занимали и различные каменные фигурки: современные, старинные, а также ритуальные — из Афганистана, Камбоджи, Китая и других стран.

Отдельная витрина содержала изделия из разноцветного агальматолита — мягкого камня, который можно резать хорошим ножом. У нас такие фигурки изготавливают в Туве. Многие мастера еще и разрисовывают свои поделки яркими красками. Посетители увидели несколько китайских изделий из серого агальматолита в технике объемной резьбы с изображениями растений, кувшинов, чаш и человечков, готовящих снадобья. Им около 150—200 лет! Совершенно чудная, уникальная



«Парусник», яшма, родонит (фото В.В.Щербакова).



Фигурка из красного агальматолита с нанесенным рисунком, Кения.

вещь — три китайца в роще за чайным столиком. Мастер умело обыграл двухцветность камня: роща зеленая, а земля — коричневая. У нас в Хакасии приглашенные китайские мастера режут великолепные фигурки из местного жадеита. Их можно увидеть в Москве, в офисе компании «Хакасинтерсервис». На выставке было всего одно такое изделие — «Носорог».

Большой интерес у посетителей вызвали частные печати (заменяющие ручную подпись), в основном китайские — из нефрита и агальматолита. Квадратные в плане, а наверху объемная фигурка зверя, чаще всего льва. Среди них выделялся один китайский комплект — печать и плоская фарфоровая баночка с мастикой красного цвета в красивой деревянной коробочке, обтянутой шелком. Внутри нее — гнезда для вещей. Это подарок одному из участников выставки от его китайских коллег.

Отдельная экспозиция была посвящена перламутру. Различные бытовые вещи: ложки для торта и супа, кулоны, броши, пуговицы. Некоторые — еще царских времен. Около 10 икон на перламутре — каменей большого размера (до 13 см). Были иконы начала прошлого века, изготовленные еще в Палестине, и современные, очень тонкой работы — из Израиля.

Очень привлекательны каминные и настольные часы в малахите, чароите, агате. Глаз не оторвать. Несколько малахитовых шкатулок и ларцов различных размеров: от пачки сигарет до пирамиды высотой в 40 см.



Нефритовый прорезной шар Китай (слева) и перламутровая икона из Палестины (фото В.В.Щербакова).



Композиции «Данила-мастер», уваровит и «Гном», подставка кремневая. Фигурки из бронзы.

Наверное, нет ни одного человека, равнодушного к нефриту. Из-за зеленого цвета его называют камнем молодости. Но бывает нефрит и белый, и черный, и красный, и даже синий. Все это можно было увидеть на выставке. За прочность нефрит называют также и камнем вечности. Очень хорош прорезной нефритовый шар, наподобие наших матрешек: в нем содержится еще восемь шаров один в другом. Это традиционное китайское искусство. Только они не раскрываются — их вырезают, не доставая один шар из другого.

Нельзя было пройти мимо чудесного колечка со вставкой из боливиана, а рядом — образец такого камня с отшлифованной одной стороной. Местоорождение этого минерала в Боливии, на границе с Бразилией. Камень еще называют аметрин: в нем аметист чередуется с цитрином.

Но всю экспозицию описать невозможно. Отдельно на полках располагались местные камни: цветной и черный кремль, оникс, щетки кварца и окаменелости.

В последние дни работы выставки среди школьников проводилась викторина «А знаешь ли ты камень?». Пришли дети с родителями, бабушками и... конспектами ответов. В качестве призов за удачные ответы выступающие получали агаты, яшму, лазурит и другие «драгоценности».

На открытии выставки поэтесса Т.П.Мельникова (москвичка и тарусянка) прочитала свои стихи, которыми мы и завершим наш рассказ. ■

Искатели камней

*Немые камни скажут нам порой
Намного больше, чем знаток иной.
У них, камней, необычайна речь,
Не каждый разгадать ее сумеет —
Лишь кто недугом каменным болеет
И осторожно сможет их рассечь.*

*Представится волшебная картина —
Та красота, что род людской спасет,
Пускай не весь — хотя бы половину.
Искатели камней — особенный народ.*

*Возможно, и сейчас — в горах, цепочкой,
Не торопясь, восходят друг за другом.
У одержимых каменным недугом
Бывают и лихие одиночки,
Сгибаясь от безумных рюкзаков,
За жизнь сшибают сотни башмаков.*

*Они на «ты» с опасной природой.
Их трудный поиск — не влияние моды.
И не диагноз — мол, неладно с «крышей».
Их дело — это порученье свыше,
Чтоб по приметам редким, неслучайным
Нам открывать Божественную тайну
Глубинного земного совершенства
И вызывать восторг и полное блаженство.*

Библиотека на Аптекарском острове

К 125-летию Института экспериментальной медицины

Ю.П.Голиков,

кандидат биологических наук,

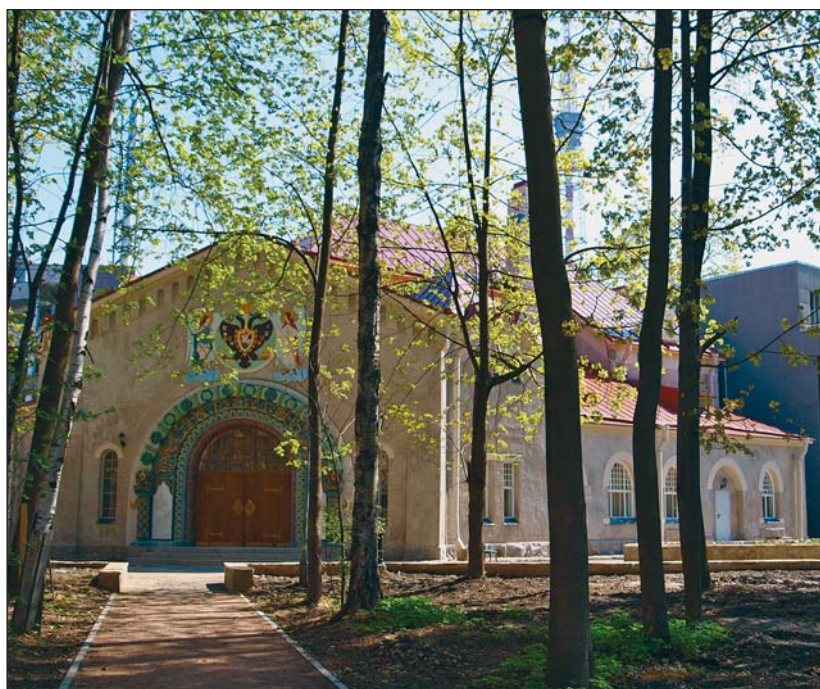
В.М.Сысуев,

кандидат биологических наук,

Музей истории НИИ экспериментальной медицины Северо-Западного отделения РАМН Санкт-Петербург

На территории усадьбы Института экспериментальной медицины, что на Аптекарском острове, на улице Академика Павлова (бывшей Лопухинской) находится одно из интереснейших уникальных зданий, возведенных в Петербурге в начале XX в. Оно привлекает внимание цельностью своего образа, ясным языком архитектурных объемов и, конечно, майоликовым декором. Более 100 лет в нем располагается научная библиотека бывшего Императорского Института экспериментальной медицины (ИИЭМ), ныне НИИ экспериментальной медицины Северо-Западного отделения РАМН.

Библиотека росла и развивалась вместе с самим институтом с момента его официального открытия 8 декабря 1890 г. Началом фонда стали примерно 500 томов по вопросам биологии и медицины, журналы и некоторые книги естественноисторического характера, подаренные 15 июня 1890 г. создателем ИИЭМ принцем А.П.Ольденбургским из своей личной библиотеки. Об этом свидетельствует экслибрис русских Ольденбургских (как называл их И.А.Бунин) на нескольких книгах из числа подаренных, которые сохранились до наших дней. По мнению специалистов из Национальной публичной библиотеки личное собрание книг принцев Ольденбургских в их дворце (Дворцовая набережная, д.2) к 1917 г. насчитывало более 30 тыс. томов.



Общий вид библиотеки с новым книгохранилищем. 2013 г.

Ввиду небольшой численности первоначально состава ИИЭМ (около 30 человек), руководство библиотекой в порядке совместительства поручалось одному из сотрудников. Весной 1891 г. директор ИИЭМ Э.-Л.Ф.Шперк предложил молодому врачу В.Г.Ушакову заняться организацией библиотеки и принять на себя дальнейшее заведование ею.

Ушаков принял предложение директора и попросил заведующих отделами института представить списки необходимых им научных пособий и журналов. Объединенный список был утвержден советом ИИЭМ, и началась систематическая библиотечная работа.

Первая запись в инвентарной книге библиотеки была сделана 1 июля 1891 г., а далее в ней встречается много пометок о поступлении книг: «дар от автора», «дар Его Высочества» и др. В то же время К.Я.Гельман — научный руководитель Санкт-Петербургской Пастеровской прививочной станции, вошедшей в состав ИИЭМ, передал из ее библиотеки 84 книги. Далее в разное время поступали книги из личных собраний ведущих сотрудников института: Э.-Л.Ф.Шперка, С.М.Лукьянова, И.П.Павлова, В.В.Подвысоцкого, Н.В.Ускова, Д.К.Заболотного и др.

Императорская Военно-медицинская академия (ИВМА) прислала около 1000 докторских диссертаций, отпечатанных в типографии и переплетенных в кожу, а Императорская Академия наук (ИАН) — 94 тома своих изданий за прежние годы. Впоследствии в библиотеку поступали также книги из личных библиотек профессоров Н.Н.Аничкова, П.С.Купалова, В.П.Михайлова, М.В.Войно-Ясенецкого и других сотрудников института, завещавших пополнить ее фонды. Так, семья покойного доктора Н.А.Гольдберга передала около 500 томов научной литературы. Кроме того, в фонд библиотеки в 1930-х годах передавались книги, конфискованные у репрессированных сотрудников института.

В первые годы фонды библиотеки росли особенно быстро благодаря поступлению всех значительных медицинских изданий, в том числе периодических, как русских, так и зарубежных; новых и закупавшихся у «антиквариев». Благодаря инициативе Ушакова организация библиотеки отличалась продуманностью и широтой. Комплектование ее фонда велось в соответствии с тематикой исследований, проводимых в ИИЭМ. Приобретались комплекты основных журналов по биологии и экспериментальной медицине от начала их издания, налаживались связи с отечественными и зарубежными издательствами и книготорговцами фирмами.

С 1892 г. начал выходить «Архив биологических наук» — печатный орган ИИЭМ. В обмен на его книжки в библиотеку стали поступать периодические издания многих зарубежных научных учреждений. Таким образом, уже через несколько лет после начала своего существования фонд библиотеки насчитывал несколько тысяч томов. На 1 января 1914 г. общее число книг было 25 тыс. 111 ед., не считая дубликатов.

С самого начала книги размещали в шкафах, стоявших в аудитории Главного здания института, в семи проходных комнатах и в коридоре деревянного, отапливаемого печами здания, по соседству с лабораториями. Ушаков ежегодно подавал письменные рапорты руководству ИИЭМ, обращая внимание на чрезвычайно стесненное положение библиотеки и на необходимость обезопасить ее от пожара.

Все ценнейшее собрание научной литературы размещалось в двухэтажном особняке с каменной пристройкой (архитектор А.Бруни, 1865). До того как его приобрел принц Ольденбургский, участком со зданием владел граф К.В.Нессельроде, далее О.Михальцева. В аудитории проводились научные заседания, читались лекции и доклады сотрудников, а также проходили заседания совета ИИЭМ. В пожарном отношении это было небезопасно и не позволяло нормально расставить книжные фонды. Однако институт не располагал средствами, необходимыми для сооружения нового книгохранилища.

Это стало возможным лишь после того, как в 1910 г. директор института Подвысоцкий получил «на нужды ИИЭМ» пожертвование действительного члена института С.Н.Виноградского в размере 40 тыс. руб., которые решили потратить на возведение современного специализированного книгохранилища. Малоизвестен факт, что Виноградский, став в 1902 г. директором ИИЭМ, отказался от полу-



Александр Петрович
Ольденбургский
(1844—1932)

Принц, генерал от инфантерии и генерал-адъютант свиты царя. Военный и государственный деятель России. Почетный член Императорской Академии наук (с 1890 г.). На свои средства основал в России первую службу борьбы с бешенством, учредил ИИЭМ и стал его попечителем. На форте «Император Александр I» близ Кронштадта устроил противочумную лабораторию, разработки которой позволили спасти множество жизней. В 1901 г. был командирован в Астраханский край «на чуму», где организовал подавление эпидемии. Благодаря его поддержке И.П.Павлов выполнил свои знаменитые исследования по физиологии пищеварения и стал в 1904 г. первым российским лауреатом Нобелевской премии. Принц вел обширную научно-просветительскую деятельность, сыграл значительную роль в развитии медицинской науки, здравоохранения и курортов России. В Первую мировую войну с 3(16) сентября 1914 г. — верховный начальник санитарной и эвакуационной части Русской Армии. 22 марта (4 апреля) 1917 г. Временное правительство уволило принца со службы. Умер в эмиграции в г.Биаррице (Франция).



Василий Гаврилович Ушаков
(1865—1953)

Выпускник ИВМА (1889), не связанный военной службой, с 1890 г. служил помощником заведующего Пастеровской станции, а после реорганизации станции в Первое практическое отделение ИИЭМ в течение 62 лет трудился в институте. Под руководством Павлова выполнил докторскую диссертацию «К вопросу о влиянии блуждающего нерва на отделение желудочного сока у собаки» (1896). Позже работал в области эпидемиологии и был крупным специалистом по борьбе с бешенством — рабиологом [1]. Заведую библиотекой в 1891—1926 гг., Ушаков был одновременно секретарем совета ИИЭМ и помощником заведующего Прививочным отделением, а с 1920 г. возглавил последнее. В 1926—1950 гг. был консультантом в библиотеке. Под его руководством собран ценнейший отраслевой фонд отечественной и зарубежной литературы, подобраны материалы по истории медицины, составлен систематический каталог, три выпуска которого были опубликованы в 1902—1905 гг. Работая здесь со дня основания, зная в совершенстве книжный фонд библиотеки и библиотечное дело, Ушаков был ценнейшим и преданным ИИЭМ работником. В 1926 г. ученый совет, членом которого он состоял, присвоил ему звание почетного библиотекаря.

чения положенного ему денежного содержания с тем, чтобы накопленная сумма «была употреблена на строительство новых помещений института».

Летом 1911 г. архитектор Г.И.Люцедарский* завершил проект библиотеки, в 1913 г. начата и закончена постройка ее четырехэтажного здания, своеобразная архитектура которого вызывает интерес и в настоящее время.

Люцедарский осуществлял архитектурный надзор за строительством библиотеки ИИЭМ, планировка и оборудование которой были предварительно тщательно продуманы. Здание построили из кирпича, перекрытия между этажами выполнили из железобетона, его конструкция и площадь были предусмотрительно рассчитаны таким образом, чтобы в нем можно было разместить до 500 тыс. томов с учетом постоянного роста книжного фонда в течение 25 лет. Рамы и двери в хранилищах металлические. На чердаке установили электрический вентилятор. Через этажи хранилищ проходит шахта небольшого лифта для подъема книг.

Помещения библиотеки с читальным залом находились на первом этаже, а книгохранилище было размещено на 2—4-м этажах. После того как посетители попадали в небольшую переднюю с 2-мя окнами, они могли пройти в комнату выдачи книг или в полукруглый читальный зал с шестью окнами. Кроме этого, имелись рабочая комната библиотекаря и холл (боковой зал), в котором были размещены справочные издания и энциклопедии.

Майоликовый портал и дубовые двери с латунными накладками, подаренные императором Николаем II, были привезены из Дрездена, где они украшали русский павильон на Международной гигиенической выставке (1911). Автором портала был архитектор В.А.Покровский, а изготовили его мастера петербургской фирмы П.К.Ваулина**.

Портал включает в себя профилированный наличник двери, тимпан (полукруглое поле фронтона), сплошь покрытый растительным орнаментом с вплетенными в него фигурками птиц,

* Григорий Ипполитович Люцедарский (1870—?), архитектор двора Его Императорского Величества. Окончил Императорскую Академию художеств в 1894 г., был принят 25 октября 1895 г. в ИИЭМ на должность техника-строителя. В 1890—1900 гг. возвел корпус на территории больницы для душевнобольных в Удельной (попечитель больницы — принц Ольденбургский), в 1897 г. — здание лазарета Института принцессы Терезы Ольденбургской на Большом проспекте Петроградской стороны, д.73 и др. В 1898—1900 гг. занимался реконструкцией помещений форта «Император Александр I» около Кронштадта для «Особой противочумной лаборатории ИИЭМ» [2]. В начале века по его проекту возвели корпус Народного дома «Императора Николая II» в Александровском парке. До наших дней уцелело только здание театра при Народном доме, которое хорошо известно жителям города как бывший кинотеатр «Великан» (ныне это площадка «Мюзик-холла»).

** Петр Кузьмич Ваулин (1870—1943), российский керамист-технолог и художник-керамист. Его имя было широко известно в художественном мире конца XIX в. Заведовал знаменитой гончарной мастерской «Абрамцево». В середине 1900-х годов создал собственное производство недалеко от Петербурга. На станции Кикерино под Гатчиной основал художественную керамическую мастерскую. Там работали виднейшие художники того времени: М.А.Врубель, А.Я.Головин, Н.К.Рерих, С.В.Чехонин, Н.Е.Лансере и др. К числу наиболее известных произведений мастерской Ваулина относятся майоликовый фриз на Доме страхового общества «Россия» в Санкт-Петербурге (ул. Б.Морская, д.35, худ. Н.К.Рерих), майоликовое и фарфоровое убранство Соборной мечети в Петербурге (архитекторы Н.В.Васильев, С.С.Кричинский, А.И.Гоген, 1910—1917), керамическая отделка Торгового дома Гвардейского экономического общества на Большой Конюшенной ул., д.21—23 (ныне известен как ДЛТ), Морской собор в Кронштадте, Ярославский вокзал в Москве, Третьяковская галерея и др. <http://www.iemrams.spb.ru/russian/library/vaulinru.htm>



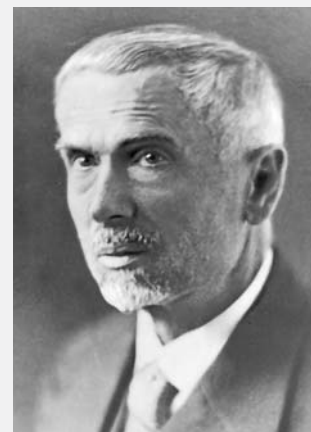
Портал библиотеки после реставрации. 2013 г.

и мощный архивольт (обрамление арочного пролета), украшенный большими цветными розетками и поясками по светлому фону. Архивольт, дуга которого приближается к полуокружности, опирается на две колонки, покрытые орнаментом и увенчанные капителями с фигурами сиринов. На каждой капители установлена деталь неправильной формы, служившая основой для майоликового герба с двуглавым орлом. От поля стены портал отделяет обрамление из более светлых майоликовых плиток. В левой части портала рядом с колонкой на одной из этих плит помещается выполненное в невысоком рельефе прелестное изображение единорога, а справа — грифона.

Пространство над порталом украшает государственный герб Российской Империи в окружении фигур архангелов, исполненный в глазурованной майолике. Эта одна из самых эффектных деталей в декоративном оформлении фасада в предвоенные годы была разрушена и после войны закрыта слоем штукатурки. Украшение было восстановлено в первоначальном виде лишь в 2013 г. в год столетнего юбилея здания библиотеки.

По сторонам от портала на главном фасаде стена прорезана узкими окнами, напоминающими бойницы. Щипец стены также оформлен стилизованными под бойницы окнами — мотивом, заимствованным из русского крепостного зодчества. По сторонам от объема передней симметрично расположены два продолговатых помещения, выделенных из объема здания выступающими снаружи частями фасада с тройным щипцовым завершением. Под каждым из трех щипцов помещается маленькое оконце с полуциркульным завершением, а на первом этаже — два узких прямоугольных окна побольше.

Стена одноэтажной части здания, обращенной в парк, прорезана большими, разной величины, окнами с арочными завершениями. Такими же окнами освещается и читальный зал, который сильно выдается из общего объема здания. Наиболее лаконично и просто решен основной объем — четырехэтажное книгохранилище. Монотонность оконных рядов книгохранилища, выходящих на Лопухинскую улицу, нарушают два больших арочных окна в первом этаже, одновременно объединяющих фасады книгохранилища и читаль-



Сергей Николаевич
Виноградский
(1856—1953)

Микробиолог, эколог, почвовед, эпидемиолог, доктор ботаники (1892), член-корреспондент по разряду биологических наук Физико-математического отделения ИАН (1894), почетный член РАН (1923), член многих зарубежных академий и обществ, включая Академию наук Франции, Лондонское Королевское общество, лауреат премии Левенгука. Ученик А.С.Фаминцына и А.де Бари. В 1891—1912 гг. С.Н.Виноградский руководил созданным им в ИИЭМ отделом бактериологии. Был членом совета ИИЭМ, в 1902—1905 гг. — директором института. В 1892—1906 гг. первый главный редактор журнала «Архив биологических наук», который издавался в ИИЭМ на русском и французском языках. Один из организаторов и первый председатель Русского микробиологического общества (1903—1905). Работая на «Чумном форте» с особо опасными инфекциями, разрабатывал методы дезинфекции. Умер в эмиграции в г. Бри-Комт-Робере (Франция). Президиум АН СССР учредил премию им.С.Н.Виноградского.



Фасад здания библиотеки, выходящий на Лопухинскую ул. 1913 г.

ного зала. Декоративный эффект здания рождается из контраста фактур: шершавой штукатурки «под шубу» и глянцевитых майоликовых вставок на стенах и на трубах здания, а также гладких плоскостей в арочных завершениях окон и надоконных перекрытиях. Обогащает это сочетание цоколь из тесаного гранита.

Фасады здания производят различное впечатление — они не повторяют друг друга. Поэтому зданию библиотеки свойственна многоликость. В зависимости от точки наблюдения она имеет как бы три образа — торжественный, рациональный и романтический.

Главный фасад отмечен особой торжественностью благодаря portalу и симметрии; следует подчеркнуть, что это единственная симметрично решенная часть здания. Парковый фасад насыщен присущей романтическому стилю «органикой» — криволинейностью форм. Он мягче, живописнее, разнообразнее из-за асимметрии в размещении архитектурных форм и мотивов, характерных для всего здания, но здесь особенно ясно читающихся. Фасад, выходящий на Лопухинскую улицу, контрастирует с парковым фасадом жесткостью сопоставления двух четких геометризованных объемов — книгохранилища и читального зала. В этом выделении и разграничении пространственных зон здания нашел выражение визуальный рационализм позднего модерна [3]. Над окнами фасада были высечены фамилии ученых, прославившихся в области медицины и естествознания.

Этот стиль оформления явно перекликается с оформлением фасада медицинского факультета Новороссийского университета в Одессе, деканом которого в 1900—1905 гг. был Подвысоцкий, возглавлявший институт с 1905 по 1913 гг. Скорее всего именно он и подал эту идею архитектору. Впервые внимание сотрудников Музея ИЭМ на этот факт обратил известный историк медицины Владимир Иванович Дедюлин.

На старой фотографии здания библиотеки можно прочесть только несколько фамилий. Для восстановления полного списка был проведен архивный поиск, в результате которого все имена были установлены.

На третьем и четвертом этажах на этом фасаде по 12 окон, соответственно, столько же надписей. Так, в верхнем ряду на четвертом этаже можно прочесть следующие имена и фамилии ученых: Гиппократ, Аристотель, Цельсий, Гален, Бэкон, Везалий, Гарвей, Левенгук, Ломоносов, Лавуазье, Броун, Мудров. На третьем этаже: Мажанди, К.Бэр, Ю.Либих, И.Мюллер, Дарвин, Генле, Пирогов, Симпсон, Зинин, К.Бернар, Грубер, Мендель. На втором и первом этажах по девять окон и столько же надписей. На втором этаже: Бр.Секкар, Гельмгольц, Вирхов, Пастер, Листер, Гексли, Бертелло, Сеченов, С.Боткин. На первом этаже: Р.Гейденгайн, Э.Геринг, Менделеев, А.Ковалевский, Р.Кох, Мечников, Нокар, Эрлих, Шаудин.

Можно предположить, что надписи с именами ученых уничтожены тогда же, когда были демонтированы герб Российской империи и фигуры архангелов на фасаде библиотеки. В 2012—2013 гг. в результате проведения реставрационных работ надписи восстановлены.

Как отмечено в исторической справке реставраторов, здание библиотеки — это один из наиболее показательных образцов русского позднего модерна 1913 г., его национально-романтического варианта, оно относится к тому ряду построек, которые представляют сплав оголенной четкой формы, близкой конструктивизму, с характерным для классицизма или Древней Руси начертанием объемов, стилизуемых в подчеркнуто романтическом духе [2]. Определяющие элементы композиции — художественно осмысленная и выявленная конструкция и пространственная организация сооружения. Их выразительность оттеняют, усиливают и обогащают, внося новые оттенки, фактурные контрасты и цветовая гамма, сопоставле-

ние ритмов, основных архитектурных форм и декора. В композиции отчетливо раскрываются пространственная организация здания, объемы четко выявлены и разграничены — об этом определенно заявляет свойственная модерну идея функциональности. Емкий, энергичный архитектурный образ, созданный Люцедарским, тем интереснее, что воплощен этот образец национально-романтического варианта модерна не в культовом, а в светском по своему назначению сооружении.

Здание научной библиотеки впервые было освящено в день празднования 300-летия царствования дома Романовых, и по бокам входных дверей установлены две мраморных доски с надписями. На первой — «Библиотека Императорского Института Экспериментальной Медицины открыта 21 февраля 1913 года в память 300-летней годовщины царствования дома Романовых», а на другой — «Здание сооружено во время Попечительства Основателя Института Его Высочества Принца Александра Петровича Ольденбургского при директоре В.В.Подвысоцком, на средства, пожертвованные бывшим директором Института С.Н.Виноградским». После 1917 г. доски были демонтированы, и их судьба неизвестна.

Библиотека имела два каталога — алфавитный и систематический — в комнате для выдачи книг. Карточки были размещены в выдвижных ящиках, которые, в свою очередь, находились в специальных шкафах. В читальном зале библиотеки регулярно выставлялись последние номера поступающих в библиотеку периодических изданий, которых в 1914 г. поступало более 200.

Во время наводнения в 1924 г. часть книг пострадала, поэтому на старых экземплярах можно увидеть штамп: «Проверено в 1924 г.». В 1920-х годах библиотека была методическим центром для медицинских библиотек Ленинграда. В течение 1933 и 1934 гг. при библиотеке работало референтное бюро. Его работа прервалась в связи с переводом многих отделов ВИЭМ в Москву в 1934 г.

В дни Ленинградской блокады во время войны 1941—1945 гг. окна первого этажа были превращены в амбразуры. Во время обстрелов и бомбежек здание не пострадало. Библиотека не прекращала работы, в нее обращались научные сотрудники и врачи города.

В 1950—1965 гг. в библиотеке был выделен дублетно-обменный фонд для передачи литера-



Фасад здания библиотеки, выходящий на ул. Академика Павлова. 2013 г.

туры во вновь организуемые библиотеки системы учреждений Академии медицинских наук СССР и АН СССР. Начат перевод систематического каталога на таблицы библиотечно-библиографической классификации (ББК). Библиотека приступила к созданию Главной справочной картотеки, которая включала отделы морфологии, физиологии, общей патологии, микробиологии, вирусологии и др.

Современное комплектование фонда соответствует тематике проводимых в институте исследований. В библиотеку ежегодно поступает до 5 тыс. книг по медико-биологическим дисциплинам, приобретает также философская литература по методологическим вопросам естествознания и медицины. Наличие такого богатого фонда определило включение научной библиотеки в перечень научных и научно-технических библиотек, имеющих исторически сложившиеся уникальные фонды большой научной и культурной ценности. Действительно, библиотека располагает крупнейшим отраслевым фондом среди библиотек нашего города. Отечественный фонд составляет около 500 тыс. книжных единиц, а иностранный — около 250 тыс. единиц.

Библиотека располагает антикварными изданиями XVI—XIX вв. Самые старые из них: «Палеотип» в трех томах Клавдия Галена (1538) и «Анатомия» Андреаса Везалия (1551). Имеется коллекция опубликованных диссертаций ИВМА, многих русских и иностранных университетов, а также дис-

сертификатов, выполненных или защищенных в ученом совете ИЭМ более чем за столетие. Собранный богатейший фонд справочных изданий: энциклопедии, справочники, словари, издания информационных центров, которые дают возможность для оперативного библиографического поиска.

Сотрудники библиотеки продолжают традицию Ушакова, который собирал исторические материалы об институте. Часть таких материалов была передана в Музей истории ИЭМ при его организации в 1989 г. и использовалась в экспозиции.

По приказу Министерства здравоохранения СССР №059/37 от 20 апреля 1981 г. научная библиотека ИЭМ отнесена к числу библиотек, имеющих уникальные фонды большой научной и культурной ценности.

Из-за тяжелой экономической ситуации в стране в конце 1991 г. прекратилось поступление в фонды библиотеки иностранной периодики, проходившее по централизованной подписке из АМН СССР. Научные работники не могли найти в библиотеках города новые публикации своих иностранных коллег. Но уже в середине 1992 г. в страну начала поступать гуманитарная помощь из Англии, США и других стран. Хотя библиотека ИЭМ и лишилась традиционно получаемых журналов, в 1992—1993 гг. были получены 130 книг и два наименования журналов с 1980 по 1990 гг. (287 единиц) из международного фонда «Книжная помощь России» и четыре наименования журналов (956 единиц) из Международного центра церковной медицины. Это были научные книги и журналы прошлых лет. В 1994 г. в научную библиотеку начали поступать иностранные журналы из фонда Сороса (Международного научного

фонда) по 10—12 наименований ежегодно. Кроме того, с 1996 г. из Института «Открытое общество» «Фонда содействия» Д.Сороса ежегодно поступают CD-диски с базой данных «Medline». В библиотеке появился новый вид информационного обслуживания читателей. В электронном виде пользователь может посмотреть реферированную библиографию из 3500 мировых научных журналов по медицине. Эта служба стала пользоваться все большим спросом, но не могла полностью удовлетворить потребности читателей увидеть перед собой полные тексты статей. В 1998 г. Институт «Открытое общество» было подписано соглашение по оказанию безвозмездной помощи в рамках благотворительного проекта «Создание центра открытого доступа к Интернету на базе библиотеки ИЭМ РАМН». На выделенные деньги закуплено оборудование и организован интернет-класс с шестью рабочими местами. Благодаря этому читатели получили доступ ко многим полнотекстовым статьям таких издательств, как «Academic Press», «Springer», «Elsevier», «Pergamon», «Blackwell», «North-Holland».

Возглавлявший институт в 1990—2009 гг. академик РАМН Б.И.Ткаченко добился выделения финансирования для строительства нового книгохранилища. В феврале 2003 г. был заложен фундамент, а в 2008 г. завершена постройка нового здания библиотеки и оснащение его современным оборудованием. Фонды были перемещены в новое помещение, а в старом началась реставрация. Нынешний директор института академик Г.А.Софронов довел дело, начатое его предшественником, до финала. Реставрация завершена, и 30 мая 2013 г. произошло торжественное открытие и повторное освящение научной библиотеки. ■

Литература

1. Ушаков В.Г. Библиотека Императорского Института экспериментальной медицины и переход ее в новое здание // Библиотекарь. 1914. Вып.2. Отдельный оттиск.
2. Библиотека Императорского Института экспериментальной медицины. Ул. Акад. Павлова, 12 (быв. Лопухинская, 12). Историческая справка // Главное управление по охране, использованию и реставрации памятников истории и культуры Исполкома Ленсовета. Институт «Ленпроектреставрация». Научно-исследовательский отдел. Л., 1990. (Служебный документ на правах рукописи).
3. Санкт-Петербургский государственный исторический архив. Ф.2282. Оп.2. Д.133 (дело Г.И.Люцедарского).

ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2014 ГОДА

По физике — И.Акасаки, Х.Аmano, С.Накамура

Нобелевская премия по физике 2014 года присуждена профессорам Исаму Акасаки и Хироси Аmano из Университета г.Нагоя (Япония), а также профессору Сюдзи Накамура из Университета Калифорнии (США) за создание ярких синих светодиодов (СД) и, на их основе, СД белого свечения [1–3]. Решая фундаментальные задачи о квантовых структурах малой размерности в твердых телах, лауреаты дали старт революции в прикладной проблеме освещения, которая приведет к значительной экономии электроэнергии. Присуждение премии в данном случае показывает, что нет жесткой границы между фундаментальной и прикладной наукой, они действуют вместе как единое целое.

Исаму Акасаки (Isamu Akasaki) родился в 1929 г. в г.Тиран (Япония), в 1952 г. окончил Научную школу Университета Киото и начал карьеру в про-

мышленности, а с 1959 г. занялся исследовательской и преподавательской работой в Университете г.Нагоя (Япония). В 1964 г. получил там докторскую степень и параллельно возглавил лабораторию фундаментальных исследований компании Мацусито. В 1981 г. стал профессором Университета г.Нагоя, а с 1992 г., выйдя на пенсию, — его почетным профессором и профессором Университета Мейдзо (Нагоя, Япония).

Хироси Аmano (Hiroshi Amano), родившийся в 1960 г. в г.Хамамацу (Япония), окончил инженерный факультет Университета г.Нагоя в 1983 г., остался там в аспирантуре и защитил диссертацию в 1989 г. С 1992 по 2010 г. работал в Университете Мейдзо, став профессором в 2002 г., а затем вернулся в альма-матер на должность профессора.

Сюдзи Накамура (Shuji Nakamura), американский гражданин, уроженец японской префектуры



Исаму Акасаки.



Хироси Аmano.



Сюдзи Накамура.

Эхиме (1954). Учился в Университете г.Токусима (выпускник 1979 г.), где в 1994 г. защитил диссертацию по электротехнике. В 1979 г. начал работать в компании «Ничия Кемикал» (Япония), выезжал на стажировку в США, а с 2000 г. получил должность профессора в Калифорнийском университете (Санта-Барбара). Имеет более 200 американских и 300 японских патентов.

И.Акасаки, Х.Аmano, С.Накамура совершили прорыв в создании ярких синих и «белых» светодиодов на основе гетероструктур с квантовыми ямами из нитрида галлия типа InGaN/AlGaN/GaN [4, 5]. Светодиоды представляют собой полупроводниковые приборы — источники света, работа которых базируется на преобразовании электрической энергии в световую [3]. Свет, отвечающий ширине запрещенной зоны, излучается при рекомбинации электронов, возбужденных в зону проводимости, и оставшихся в валентной зоне дырок. В настоящее время излучение СД занимает широкий диапазон длин волн, от инфракрасного до ультрафиолетового. Первые СД были разработаны и созданы в 50-х — 60-х годах XX в. в ряде лабораторий. Их длины волн излучения имели различные значения, но лежали в интервале от инфракрасного лишь до зеленого цвета. Чтобы получить с помощью таких источников синий цвет свечения, понадобилось существенно больше времени — более 30 лет. Для этого нужно было разработать технологию выращивания кристаллов высокого качества на основе полупроводниковых материалов с большей шириной запрещенной зоны. Решать задачу пришлось на уровне высоких технологий: были созданы установки для роста кристаллов методом металлоорганической газовой эпитаксии, с помощью которых было обеспечено контролируемое легирование слоев широкозонных полупроводников с *p*-типом проводимости.

Это стало возможным к концу 80-х годов прошлого века, когда удалось реализовать *p*-тип проводимости и создать большую концентрацию дырок в нитриде галлия (GaN), легированного акцептором магнием. Для получения эффективных светодиодных структур синего цвета свечения потребовалось также разработать технологии выращивания твердых растворов на основе InGaN и AlGaN с различным содержанием индия и алюминия и создания многослойных структур InGaN/AlGaN/GaN с активной областью малой толщины — *p-n*-гетеропереходом в структурах с квантовыми ямами.

Впервые излучение, генерируемое в твердом теле при протекании электрического тока, было обнаружено Генри Джозефом Раундом в 1907 г. в лаборатории Гульельмо Маркони [6]. Раунд заметил, что свечение возникает при приложении напряжения к точечному контакту металла с карборундом (SiC, карбидом кремния). При низких напряжениях наблюдался желтый свет, а с по-

вышением напряжения добавлялись другие цвета. Советский физик Олег Владимирович Лосев также обнаружил этот эффект — в 1920—1930-х годах он подробно исследовал свечение полупроводника в контакте металл—полупроводник и отмечал: «Здесь происходит совершенно своеобразный электронный разряд, не имеющий, как показывает опыт, накаленных электродов». Свечение было «безынерционное», т.е. не имеющее заметного послесвечения. Лосев получил патент на «световое реле для быстрой телеграфной и телефонной связи, для передачи изображений на расстоянии» и назвал возможный прибор безынертным источником света. Это, по существу, было изобретением светодиода и предсказанием современной оптоэлектроники [4—7]. Стоит отметить, что данные результаты были получены задолго до создания современной электронной теории полупроводников.

Развитие физики твердого тела и особенно физики полупроводников в 1940-х годах позволило понять принцип работы *p-n*-переходов, что привело к изобретению транзистора в США в 1947 г. (Нобелевская премия 1956 г. У.Шокли, Дж.Бардина и У.Брэттена). Стало ясно, что *p-n*-переход, контакт двух областей соответственно с дырочным и электронным типом проводимости, может быть перспективным для излучения света. В 1951 г. К.Леховец с коллегами в США [8] попытались объяснить электролюминесценцию в SiC как результат инжекции носителей в контакте металл—полупроводник с последующей излучательной рекомбинацией электронов и дырок. Однако наблюдаемая энергия фотона оказалась меньше ширины запрещенной зоны SiC, и авторы предположили, что излучательная рекомбинация, скорее всего, происходит на примесях или дефектах кристаллической решетки. В 1955 г. инжекционная электролюминесценция была обнаружена в ряде полупроводниковых структур типа A^{III}B^V [9]. В 1955—1956 гг. Дж.Хейнс показал, что электролюминесценция наблюдается в германии и кремнии; она была объяснена излучательной рекомбинацией электронов и дырок в области *p-n*-перехода [6, 10], рис.1.

За последующие несколько лет были разработаны методы, позволяющие создавать эффективные *p-n*-переходы в арсениде галлия (GaAs). Этот полупроводник — прямозонный*, поэтому в нем велика вероятность рекомбинации электронов и дырок без участия фононов. Ширина запрещенной зоны GaAs при комнатной температуре составляет 1.4 эВ, что соответствует излучению

* Термин «прямозонный» подразумевает, что в координатах квазиимпульс—энергия минимум зоны проводимости лежит точно над максимумом валентной зоны. Поскольку при переходе между этими состояниями квазиимпульс электрона не меняется, такие переходы могут происходить с излучением фотонов, без участия фононов.

в инфракрасном диапазоне. Летом 1962 г. появилось сообщение о наблюдении излучения в GaAs [11], а через несколько месяцев независимо и практически одновременно тремя исследовательскими группами было обнаружено и когерентное (лазерное) излучение в GaAs при температуре жидкого азота (77 К) [6]. Но прошло еще несколько лет, прежде чем лазерные диоды получили широкое распространение.

Жорес Иванович Алфёров и его группа в Физико-техническом институте им.А.Ф.Иоффе в 60-х годах прошлого века исследовали гетероструктуры соединений типа $A^{III}B^V$ на основе арсенида галлия. Было показано, что в двойных гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ эффективность излучательной рекомбинации — внутренний квантовый выход излучения — достигает 99.7%. За эти работы Ж.И.Алфёров (совместно с Г.Кремером) был удостоен Нобелевской премии 2000 года.

Появление гетероструктур позволило локализовать носители в квантовых ямах таких структур при одновременном снижении оптических потерь. Лазерные диоды стали работать в непрерывном режиме при комнатной температуре, что открыло дорогу для их использования в различных областях науки и техники.

В конце 1950-х годов начались исследования электролюминесценции фосфида галлия (GaP) [6, 9], ширина запрещенной зоны которого равняется 2.2 эВ. Определенные трудности на пути создания светодиодов на его основе возникли по причине того, что GaP — непрямозонный полупроводник и рекомбинация носителей в нем возможна лишь с участием фононов, что снижает ее вероят-

ность и, как следствие, эффективность излучения. Скачок в создании эффективных СД на основе GaP был сделан параллельно тремя исследовательскими группами из Германии, Великобритании и США [6]. Использование различных легирующих примесей, например Zn-О или N в разных концентрациях, позволили исследователям получить целый ряд длин волн излучения в диапазоне от красного до желто-зеленого цвета. К концу 1960-х годов многие производители в разных странах начали промышленно изготавливать красные и желто-зеленые СД на основе GaP [12].

У кристаллов твердых растворов $GaAs_{1-x}P_x$ длина волны излучения может быть короче, чем у аналогов из GaAs, и достигать видимого диапазона, в то время как запрещенная зона остается прямой для значения параметра x ниже 0.45. Н.Холоньяк-младший с коллегами в конце 1950-х годов начали заниматься проблемой создания $p-n$ -переходов в таких соединениях, и им удалось сделать из них СД. В 1962 г. был создан лазерный диод с длиной волны излучения 710 нм, лежащей в красном диапазоне [6, 13].

Получение синего света в полупроводниковом кристалле оказалось значительно более трудной задачей. Ранние попытки построить источник синего света на базе материалов ZnSe и SiC успеха не имели. Материалом, который смог позволить разработать синие СД, стал нитрид галлия.

GaN — прямозонный полупроводник типа $A^{III}B^V$ со структурой кристаллической решетки типа вюрцита. Его выращивают на подложках из сапфира (Al_2O_3) или SiC, несмотря на различие постоянных кристаллической решетки. Для легирования GaN используют, например, кремний (для создания n -типа проводимости) и магний (для p -типа проводимости). Нелегированный GaN имеет n -тип проводимости, ширина его запрещенной зоны равна 3.4 эВ при комнатной температуре, что соответствует длине волны излучения в ультрафиолетовой области. К сожалению, легирование вносит изменения в технологический процесс роста GaN, по причине чего материал становится хрупким.

О создании эффективных источников излучения на основе GaN серьезно думали несколько исследовательских групп уже в конце 1950-х годов. Г.Гриммайс и Н.Кельманс получили эффективную фотолюминесценцию GaN в широком спектральном диапазоне, используя различные активаторы [6]. Но в то время вырастить кристаллы GaN было очень трудно, исследовались только небольшие порошковые образцы, а создать $p-n$ -переход в таком материале технологически было невозможно.

Первые кристаллы GaN были выращены в конце 1960-х годов методом хлоридно-гидридной эпитаксии (HVPE) [6, 14]. Изучением технологии роста и легирования GaN с целью разработки синих светодиодов занимались ряд лабораторий

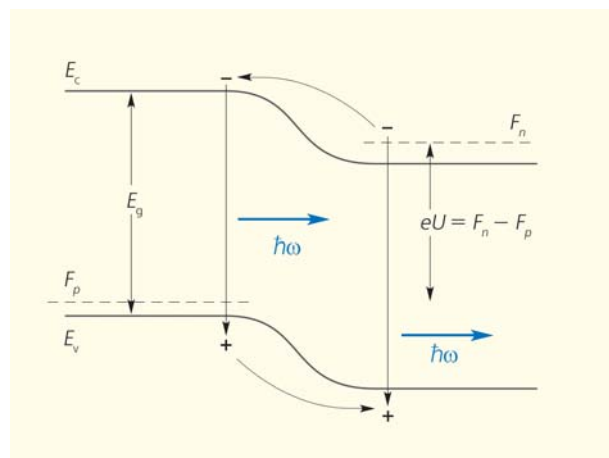


Рис.1. Энергетическая диаграмма электронно–дырочного ($p-n$ -) перехода при приложении потенциала eU в прямом направлении. Стрелками показана инжекция электронов и дырок при прямом токе через переход и их последующая рекомбинация с излучением квантов света $\hbar\omega$. Здесь E_v — потолок валентной зоны, E_c — дно зоны проводимости, F_p и F_n — квазиуровни Ферми для дырок и электронов, соответственно, E_g — ширина запрещенной зоны.

в Соединенных Штатах, Японии и Европе [6, 15]. Возникшие проблемы казались непреодолимыми: шероховатость поверхности не контролировалась, большая концентрация примесей переходных металлов загрязняла выращенный материал. Легирование *p*-области акцепторными примесями сопровождалось компенсацией отрицательных ионов акцепторов положительными ионами водорода H⁺. Роль водорода в то время еще не была изучена.

Ж.И.Панков, ведущий ученый в данной области, писал, что, несмотря на значительный прогресс в изучении GaN, произошедший в те годы, многое еще только предстоит сделать [6]. Основными целями в технологии выращивания GaN, по его мнению, должны были быть синтез объемных монокристаллов, а также обеспечение эффективного легирования мелкими акцепторами для достижения высоких концентраций дырок в материале *p*-типа.

В 1970-х годах были разработаны новые методы выращивания кристаллов, а именно молекулярно-лучевая эпитаксия (MBE) [6] и металлоорганическая газофазная эпитаксия (MOVPE) [6]. Были предприняты усилия по выращиванию GaN этими методами [6]. Исаму Акасаки начал изучать GaN в 1974 г., в то время он работал в Исследовательском центре компании «Мацусита» в Токио. В 1981 г. он занял должность профессора в университете г.Нагоя и продолжил исследования GaN вместе с Хироси Амано и другими сотрудниками. Первые кристаллы GaN высокого качества и с хорошими оптическими характеристиками были получены ими методом MOVPE в 1986 г. [6, 15]. Прорыв стал результатом целой серии экспериментов и наблюдений. Тонкий (30 нм) слой из поликристаллического AlN осадил на подложке из сапфира при низкой температуре (500°C), а затем нагрели до температуры роста GaN (1000°C). В процессе нагрева слой приобретал текстуру мелких кристаллитов с определенной ориентацией, на которых можно было выращивать GaN. Плотность дислокаций растущего кристалла GaN вначале была высокой, но быстро уменьшалась после образования слоя толщиной в несколько микрометров. Исследователям удалось получить слои с поверхностью высокого качества, что было важно для последующего выращивания тонких многослойных структур. Кроме того, оказалось возможным растить слои *n*-GaN с существенно более низкой концентрацией электронов. Сюдзи Накамура, будучи сотрудником японской химической компании «Ничия Немикал», позже разработал аналогичный метод, где AlN был заменен тонким слоем GaN, выращенным при низкой температуре [15].

Одной из основных проблем для изготовления *p-n*-переходов была трудность с легированием *p*-GaN — нужно было создать контролируемый технологический процесс, обеспечивающий большую концентрацию дырок.

На физическом факультете Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова в 1981—1982 г. группа Г.В.Сапарина и М.В.Чукичева показала, что в GaN возможна активация акцепторов Zn электронным пучком в растровом электронном микроскопе. Исследователи использовали это для оптической записи информации с шириной линии менее 1 мкм [15—17].

В конце 1980-х годов Акасаки, Амано и их коллеги сделали важный дальнейший шаг в этом направлении. Они продемонстрировали, что с помощью сканирующего электронного микроскопа можно создать слой GaN с активированными акцепторами Zn [6, 15]. Подобным же образом облучение электронами приводило к улучшению излучающих свойств GaN, легированного акцепторами Mg [6, 15]. Это открытие стало важным прорывом на пути к созданию *p-n*-переходов в GaN.

Объяснение эффекта электронного облучения было дано как в работах МГУ [16, 17], так и в статье Накамуры и его коллег [18]. Ионы акцепторов Mg⁻ или Zn⁻ образуют комплексы с ионами водорода H⁺, материал становится компенсированным. Иначе говоря, при легировании акцепторами дырки не образуются. Подобный эффект нейтрализации примесей водородом был известен из работ группы Панкова по другим материалам [6, 15]. Действие электронного пучка, нагревающего GaN:Mg до температур выше 400°C, разделяет комплексы Mg-H и активирует акцепторы. Накамура показал, что термическая обработка — отжиг в атмосфере азота N₂ — тоже приводит к активации акцепторов Mg.

Важнейшим шагом в разработке эффективных синих светодиодов было создание технологии выращивания и легирование *p*-типа твердых растворов на основе нитридов, AlGa_xN, InGa_xN, которые необходимы для получения гетероструктур. Такие гетероструктуры были созданы в начале 90-х годов исследовательскими группами Акасаки и Накамуры [6, 15].

На рис.2 приведена энергетическая диаграмма двойной гетероструктуры с *p-n*-переходом *p*-GaN/*p*-AlGa_xN/In_xGa_{1-x}N/*n*-GaN при прямом токе. Дырки из *p*-области инжектируются в область In_xGa_{1-x}N с меньшей шириной запрещенной зоны и встречают потенциальный барьер, ограничивающий их инжекцию в *n*-область. В свою очередь, электроны из *n*-области инжектируются в область In_xGa_{1-x}N и встречают потенциальный барьер, ограничивающий их инжекцию в *p*-область.

Толщина потенциальной ямы *d* может быть сделана очень малой, сравнимой с длиной волны де Бройля для электронов. Энергетический спектр электронов и дырок в такой системе зависит от толщины *d* в соответствии с законами квантовой механики — здесь говорят о квантовой яме. Инжекция в квантовую яму приводит к большой концентрации электронно-дырочных пар, и в ней увеличи-

вается вероятность излучательной рекомбинации. Акасаки и его коллеги разработали структуры на основе AlGaIn/GaN [1, 4, 6, 15]. Накамура с большим успехом использовал для создания гетеропереходов комбинации InGaIn/AlGaIn/GaN и InGaIn/GaN, делая на их основе одиночные и множественные квантовые ямы [2, 6, 15, 19]. В 1994 г. Накамура и его коллеги добились значения квантового выхода излучения такой структуры с квантовыми ямами 2.7%, используя двойной гетеропереход InGaIn/AlGaIn/GaN (рис.3) [18]. Эти важные первые шаги открыли путь к разработке эффективных синих светодиодов. Обе исследовательские группы из Японии продолжали развивать технологию производства синих светодиодов в сторону повышения эффективности, а также расширения возможных приложений. Синее лазерное излучение на основе GaN-гетероструктур наблюдалось обеими группами в 1995—1996 гг. [1, 2, 6]. Группа в МГУ показала, что в синих светодиодах Накамуры внешний квантовый выход излучения достигает 9% [20].

Современные эффективные СД на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов стали результатом целой серии прорывов в физике полупроводниковых кристаллов и в физике излучающих устройств на основе полупроводниковых гетероструктур. Исследования оптических явлений в светодиодах позволили существенно повысить коэффициент вывода оптического излучения из прибора. История развития синих, зеленых, красных и «белых» СД проиллюстрирована на рис.4.

Успешная разработка эффективных СД привела к возможности создания белых источников света. Одним из способов получения белого света может быть использование свечения одновременно нескольких СД разного цвета, а именно красного, зеленого и синего (рис.5,а). Если в комбинации с синим светодиодным кристаллом использовать люминофоры, которые при возбуждении синим светом имеют либо желто-зеленую полосу свечения, либо желто-зеленую с красным, то также возможно получить белый свет (рис.5,б и в). Подбирая различные люминофоры, относительную интенсивность синей и желто-зеленой полосы, добавляя дополнительный красный люминофор, можно менять цветовую температуру белого цвета. Таким образом оттенок белого цвета можно изменять от «холодного» до «теплого» диапазона. Один из вариантов получения белого цвета — возбуждение трех люминофоров (красного, зеленого и синего) с помощью светодиодного кристалла УФ-диапазона (рис.5,г).

Стоит отметить, что в источниках света на основе СД в основном используются первые три упомянутых выше метода.

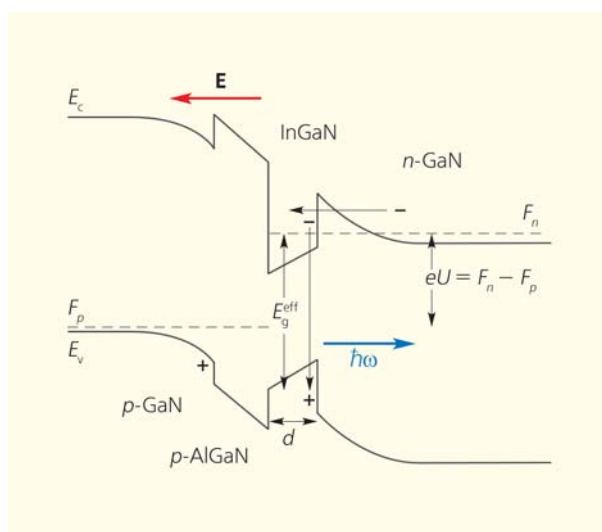


Рис.2. Инжекция электронов и дырок в квантовую яму ширины d и излучательная рекомбинация в двойной гетероструктуре на основе нитрида галлия. E — напряженность электрического поля.

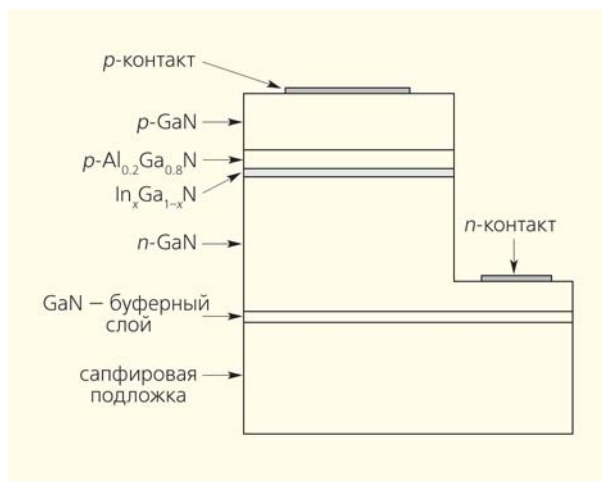


Рис.3. Схема светодиодной гетероструктуры типа InGaIn/AlGaIn/GaN [21].

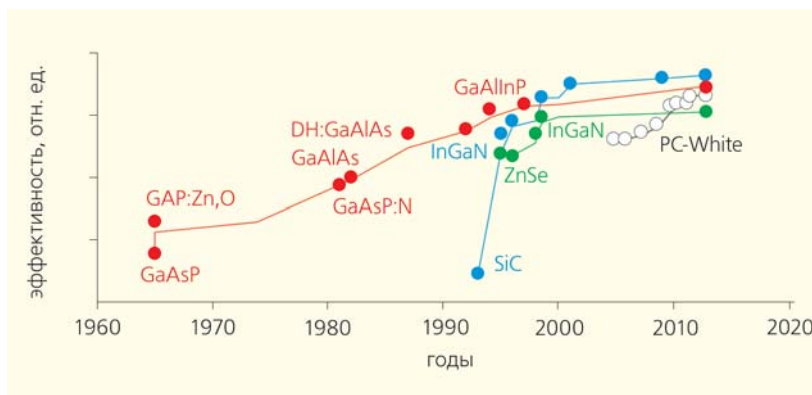


Рис.4. История развития синих, зеленых, красных и «белых» СД.

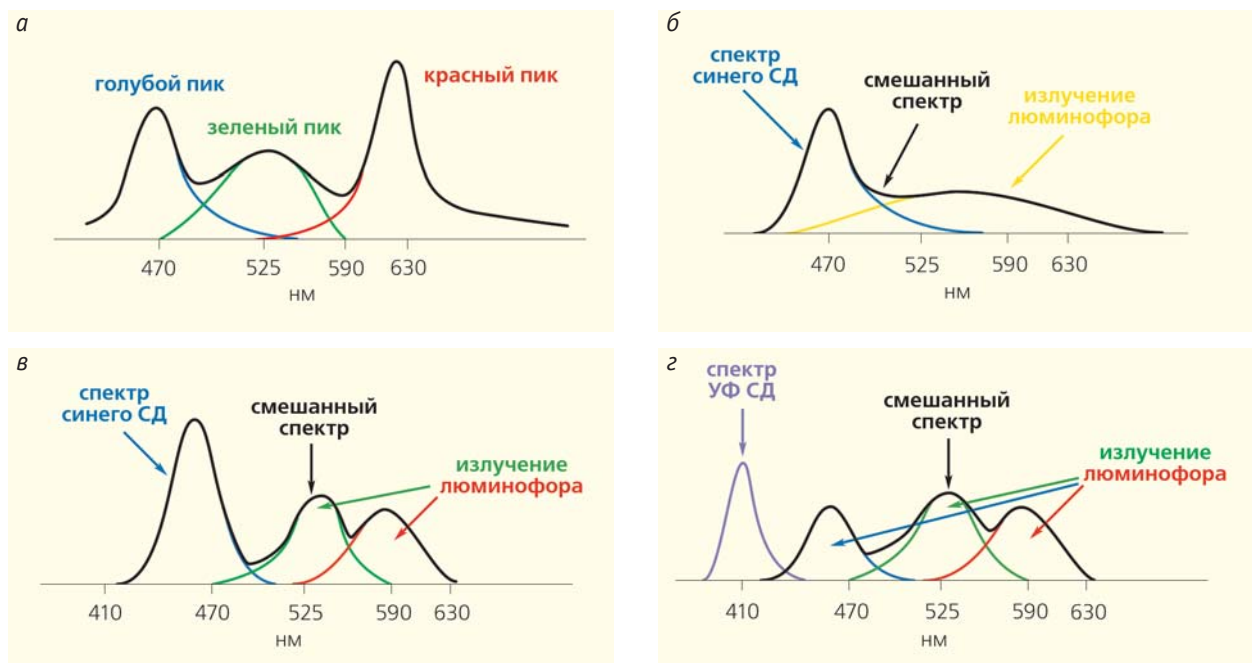


Рис.5. Методы получения белого цвета с помощью светодиодов: комбинация нескольких СД разного цвета: красного, зеленого и синего (а); комбинация синего светодиодного кристалла с желто-зеленым люминофором (б); комбинация синего светодиодного кристалла с желто-зеленым и красным люминофором (в); комбинация УФ-кристалла с тремя люминофорами: синего, зеленого и красного цвета (з).

Эти источники света, имеющие достаточно большой срок службы (более 50 тыс. ч), применяются сейчас в качестве замены ламп накаливания и разрядных ламп в светотехнических изделиях.

Сегодня белые СД на базе GaN служат основными источниками света в дисплеях на основе жидких кристаллов — в компьютерных мониторах и экранах телевизоров, а также в большинстве мобильных устройств (телефонах, планшетах, ноутбуках и т.д.). Синие и ультрафиолетовые диодные лазеры из GaN также используются для записи в компакт-дисках DVD; они необходимы для хранения информации, включая музыку, фотографии и фильмы. Будущие применения могут включать в себя использование ультрафиолетовых СД на основе AlGaIn/GaN в системах очистки воды и воздуха, так как УФ-излучение обладает бактерицидным, противогрибковым и противовирусным действием.

В последнее время начался новый этап в развитии светодиодного освещения. В конце 2011 г. светотехнические устройства со светодиодами из GaN превысили по световой отдаче традиционные источники освещения — лампы накаливания и разрядные лампы. Это означает революцию в светотехнике.

Коэффициент полезного действия лампочки накаливания, изобретенной Томасом Эдисоном в 1879 г., всего около 4%. Это соответствует значению световой отдачи ~16 лм/Вт. Световая отдача люминесцентной лампы, предложенной П.Купером Хьюиттом в 1900 г., достигает 70 лм/Вт. А у промыш-

ленно выпускаемых белых светодиодах этот параметр — более 100 лм/Вт, у лучших промышленных образцов — порядка 140 лм/Вт. Рекордные значения световой отдачи белых светодиодов, достигнутые в лабораториях в 2014 г., превышают 300 лм/Вт, что соответствует КПД 50%.

Используемые для освещения белые светодиоды большей частью основаны на комбинации мощных синих кристаллов и различных люминофоров, преобразующих синий свет в белый. Помимо высокой эффективности СД имеют длительный срок службы. Стоимость светодиодов за последнее десятилетие упала в 20 раз, и они продолжают дешеветь; ожидается, что их цена в конце 2015 г. станет меньше, чем у соответствующих эффективных люминесцентных ламп. Рынок светодиодных источников освещения переживает бум.

Заглядывая в будущее, можно предсказать, что трехцветные и многоцветные сборки светодиодов также найдут свою нишу для применения в освещении. Это позволит создать динамическое управление цветовой композицией, что существенно расширит области применения светодиодных светотехнических устройств.

Замена обычных ламп, особенно ламп накаливания, на светодиодные приведет к резкому снижению потребления электроэнергии (в промышленно развитых странах на освещение идет около 20–30% всего энергопотребления).

Прежние технологии освещения будут заменены на новые, светодиодные. В странах с недоста-

точно развитыми электросетями или их вообще не имеющих можно использовать осветительные приборы на основе белых СД. Аккумуляторные источники питания для них будут заряжаться днем от солнечных батарей. В этом случае произойдет переход от керосиновых ламп сразу к белым светодиодным лампам.

Подводя итог всему сказанному, еще раз отметим, что работа нобелевских лауреатов 2014 г. использовала решение фундаментальных задач о квантовых структурах малой размерности в твердых телах, в частности в полупроводниковых гетероструктурах, для решения прикладной проблемы экономии электроэнергии в освещении.

Исследования и разработки во всем мире, международная научная кооперация, поддержка правительствами ряда стран создали новую светодиодную промышленность. Светодиоды белого све-

чения стали основой светотехники настоящего и ближайшего будущего. Миллионы людей уже сейчас используют светодиодное освещение.

Поскольку энергия, потребляемая новыми источниками белого света, в 10 раз меньше, чем требующаяся для ламп накаливания, использование эффективных синих СД кристаллов приводит к существенной экономии электроэнергии. Это, несомненно, должно принести огромную пользу человечеству, не только заметно снизить энергопотребление, но и улучшить экологическую ситуацию.

А.Н.Туркин,

кандидат физико-математических наук,

А.Э.Юнович,

доктор физико-математических наук

Московский государственный университет

им.М.В.Ломоносова

Литература

1. Akasaki I., Amano H. Breakthroughs in improving crystal quality of GaN and invention of the *p-n* junction blue-LED // Jpn. J. Appl. Phys. 2006. V.45. P.9001—9010.
2. Nakamura S., Krames M.R. History of gallium-nitride-based light-emitting diodes for Illumination // Proceeding of the IEEE. 2013. P.1—10.
3. Юнович А.Э. Светодиоды на основе гетероструктур из GaN и его твердых растворов // Светотехника. 1996. №5/6. С.2—7.
4. Юнович А.Э. Лауреат Премии Киото 2009 года Исаму Акасаки и немного истории светодиодов // Светотехника. 2010. №2. С.65—66.
5. Рабинович О.И., Юнович А.Э. Об открытии полупроводниковых источников света (к истории создания светодиодов) // Светотехника. 2014. №3. С.40—45.
6. Шуберт Ф.Э. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. проф. А.Э.Юновича. М., 2008.
7. Lossev O.V. Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals // Philosophical Magazine. 1928. V.6. P.1024—1028.
8. Lebovick K., Accardo C.A., Jamgochian E. // Injected light emission of silicon carbide crystals // Phys. Rev. 1951. V.83. P.603—607.
9. Wolff G.A., Hebert R.A., Broder J.D. Electroluminescence of GaP // Phys. Rev. 1955. V.100. P.1144—1148.
10. Braunstein R. Radiative transitions in semiconductors // Phys. Rev. 1955. V.99. P.1892—1893.
11. Pankove J.I. // Tunneling-assisted photon emission in gallium arsenide *p-n* junctions // Phys. Rev. Lett. 1962. V.9. P.283—285.
12. Юнович А.Э. Излучательная рекомбинация и оптические свойства фосфида галлия / В сб. Излучательная рекомбинация в полупроводниках. М., 1972. С.224—304.
13. Holonyak N., Bevacqua S.F. // Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions // Appl. Phys. Lett. 1962. V.1. P.82—83.
14. Maruska H.P., Tietjen J.J. The preparation and properties of vapour-deposited single-crystalline GaN // Appl. Phys. Lett. 1969. V.15. P.327—329.
15. Туркин А. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и Технологии. 2011. №5. С.6—10.
16. Четверикова И.Ф., Чукичев М.В., Храмцов А.П. Оптические свойства нитрида галлия // Обзоры по электронной технике. 1982. Сер.6. Вып.1, 8.
17. Сапарин Г.В., Обыден С.К., Четверикова И.Ф., Чукичев М.В. // Бюллетень МГУ. Сер.3. Физика и Астрономия. 1983. Т.24. №3.
18. Nakamura S., Iwasa N., Senoh M., Mukai T. Hole compensation mechanism of *p*-type GaN Films // Jpn. J. Appl. Phys. 1992. V.31. P.1258—1266.
19. Kudryashov V.E., Turkin A.N., Yunovich A.E., Zolina K.G., Nakamura S. Spectra of superbright blue and green InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes // Journal of the European Ceramic Society. 1997. V.17. Iss.15—16. P.2033—2037.
20. Туркин А.Н., Юнович А.Э. Измерения мощности излучения голубых и зеленых InGaIn/AlGaIn/GaN светодиодов с помощью фотопреобразователей из аморфного кремния // Письма в ЖТФ. 1996. Т.22. Вып.23. С.82—86.

По химии — Ш.Хелль, У.Мернер, Э.Бетциг

Нобелевскую премию по химии за разработку флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения получили три исследователя: Штефан Хелль (Германия), Уильям — Мернер (США) и Эрик Бетциг (США).

Немецкий физик Штефан Хелль (Stefan W. Hell) родился в 1962 г. в г.Сынтана (Румыния), а в 1979 г. эмигрировал с родителями в ФРГ. Там он поступил в Гейдельбергский университет, где получил степень доктора по физике. В 1996 г. стал профессором физики, а в 2002 г. — директором Института биофизической химии общества Макса Планка (Max Planck Institute for Biophysical Chemistry) в Геттингене. Там он основал отдел нанобиофотоники, а в 2003 г. возглавил отдел оптической наноскопии в Немецком центре по исследованию рака в Гейдельберге.

Второй лауреат, Уильям Мернер (William E. Moerner), родился в Калифорнии в 1953 г. Окончив Университет Вашингтона в Сент-Луисе (штат Миссури), получил с отличием три степени бакалавра: по физике, электротехнике и математике, а докторскую степень по физике — в Корнелльском университете. Затем работал в компании IBM, в Калифорнийском университете в Сан-Диего и в Гарвардском университете. В 1998 г. вместе со своей группой перешел в Стэнфордский университет, где в настоящее время руководит химическим факультетом.

Американский физик-экспериментатор, изобретатель и инженер Эрик Бетциг (Eric Betzig) родился в г.Энн Арбор (штат Мичиган) в 1960 г. По окончании Калифорнийского технологического института получил степень доктора прикладной физики и инженерии в Корнелльском университете. Работал в лаборатории «Белл», а затем на станкостроительном заводе своего отца «Ann Arbor Machine Company» в г.Челси (штат Мичиган), после чего, решив вернуться в науку, по его же словам, «укрылся в своей хижине и начал думать». В результате разработал новые технологии оптической микроскопии и воплотил их в жизнь в исследовательском кампусе «Джанелия» при Медицинском институте Говарда Хьюза (штат Мэриленд), где сейчас возглавляет лабораторию.

Итак, Нобелевская премия по химии вручена трем физикам за разработку прикладных методов флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения, очень важных прежде всего в биологии и медицине. Это говорит не только об актуальности междисциплинарных исследований, но и о значении микроскопической техники в современной науке.

Действительно, важность такого прибора, как микроскоп, трудно переоценить. Достаточно вспомнить хотя бы его роль в открытии возбудителя чумы. Эта «черная смерть» буквально выкашивала в средние века население Европы. Все по-



Уильям Мернер.



Штефан Хелль.



Эрик Бетциг.

пытки бороться с эпидемиями ни к чему не приводили до тех пор, пока не изобрели микроскоп и не открыли чумную бактерию *Yersinia pestis*. Совершенно очевидно, что ни одно изобретение не спасло столько жизней, сколько микроскоп в руках микробиологов и врачей. Все это блестяще описано в многократно переизданной книге Поля де Крюи «Охотники за микробами» (СПб., 2006).

Микроскоп позволил открыть микромир, бороться с болезнями, изучать живые клетки и многое-многое другое. Однако возможности микроскопа с момента его изобретения и до начала XXI в. были ограничены так называемым дифракционным пределом. Смысл его состоит в том, что в любой оптической системе из-за дифракции света объекты меньше определенного размера (примерно половины длины световой волны, т.е. около 0.2 мкм) увидеть невозможно. Это было доказано немецким физиком Эрнстом Аббе [1]. Выведенная им формула дифракционного предела имеет настолько важное значение в оптике, что ее факсимиле выбито на памятнике Аббе в Йене:

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}$$

В этой формуле d — минимальный размер объекта, который теоретически можно увидеть с помощью увеличивающей оптической системы, состоящей из линз, λ — длина световой волны, n — коэффициент оптического преломления среды, заполняющей пространство между объектом и объективом, α — угол, под которым свет от объекта заходит в оптическую систему (точнее, половина этого угла, ограниченная оптической осью системы). Если взять коротковолновый свет (синий, с длиной волны 500 нм), самое большое значение коэффициента преломления (1.51 для иммерсионного масла, используемого с высокоапертурными объективами) и теоретически максимально возможный угол 90° , когда объект находится в плоскости входного зрачка оптической системы ($\sin 90^\circ = 1$), то по формуле Аббе окажется, что теоретически увидеть в микроскоп ничего меньше 166 нм нельзя. На практике это значение достигает 200 нм, а значит все, что меньше (большинство внутриклеточных органелл, не говоря уже о биомолекулах), увидеть невозможно, как бы мы ни совершенствовали оптическую систему.

Со времени расчета дифракционного предела не прекращались попытки его обойти. Первые результаты относятся к 40-м годам XX в., когда были открыты флуорофоры, или флуорохромы. Эти органические вещества под действием света определенной длины волны (возбуждающего света) начинали светиться светом другой, обычно большей длины волны (возбужденным светом). Первым открыли хорошо известный теперь флуоресцеин, который при действии синего света светился

зеленым. Таким образом, если окрасить объект флуоресцеином, осветить синим светом, а перед глазами (или перед фотоаппаратом) поставить зеленый светофильтр, который задержит отраженные от объекта синие лучи и пропустит зеленые, то мы увидим (сфотографируем) только интересующий нас объект, и ничего больше. Подробнее о дифракционном барьере и флуоресцентной микроскопии [2].

Флуорохромы дали исследователям совершенно новые возможности: если можно покрасить флуорохромом интересующий объект и заставить его светиться, то неважно, какого он размера. При достаточно ярком свечении объект будет виден. Так появилась флуоресцентная микроскопия (рис.1). Источником света в этом методе служит сам объект исследования (внутриклеточные органеллы, белки, бактерии и т.д.), а все, что нас не интересует, не светится и не мешает. Появление во второй половине XX в. флуоресцентных микроскопов и многочисленных флуоресцентных красителей, избирательно заставляющих светиться разным цветом различные органеллы, белки, мембраны и многое-многое другое, дали колоссальный толчок развитию медико-биологических исследований и диагностики.

Однако две проблемы портили радостную картину. Во-первых, у каждого оптического прибора, включая микроскоп, есть плоскость фокуса, и рассеянный свет от структур, расположенных вне этой плоскости, мешал разглядеть то, что в фокусе. Во-вторых, дифракционный предел никуда не делся, и изображения всех светящихся структур с размерами, меньшими этого предела (приблизительно 200 нм), превращались в пятно размером в те самые 200 нм. Если же расстояние между двумя

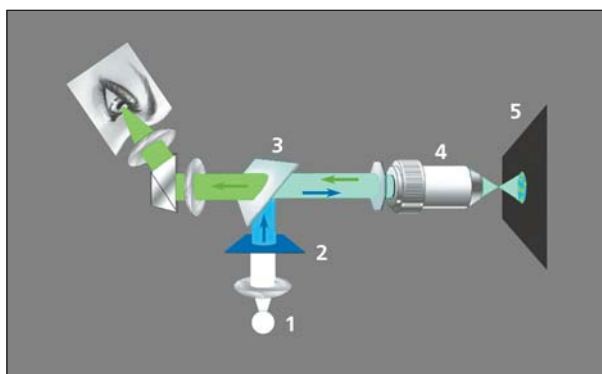


Рис.1. Принцип флуоресцентного микроскопа. Свет (1) от источника (обычно это ртутная лампа) проходит сквозь возбуждающий синий светофильтр (2), попадает на светоделительную пластину-бимсплиттер (3), которая отражает синие лучи и пропускает зеленые, отражается от нее, идет в объектив микроскопа (4) и освещает объект (5). Молекулы флуорохрома начинают светиться, их изображение идет через объектив, проходит сквозь бимсплиттер и фокусируется в глаз исследователя.

структурами было меньше дифракционного предела, то микроскоп видел их как одну.

Первую проблему решил американский физик Марвин Мински (Marvin Lee Minsky), который в 1961 г. запатентовал принцип сканирующего конфокального (confocal — софокусный) флуоресцентного микроскопа. Именно на его основе Хелль создал свою систему сверхвысокого разрешения, поэтому про сканирующий конфокальный микроскоп необходимо рассказать подробнее.

Современные микроскопы этого типа называются лазерными сканирующими конфокальными микроскопами (рис.2). В них источником возбуждающего света, который должен осветить объект и заставить светиться флуорохром, служит лазер. Этот мощный источник испускает пучок параллельных монохромных когерентных (т.е. одинаковых) лучей, что делает такой пучок идеальным для манипулирования с помощью линз. Оптическая система микроскопа отправляет пучок последовательно на два зеркала, сидящих на осях управляемых компьютером гальванометрических шаговых электродвигателей, а затем в объектив микроскопа. Пройдя через объектив, луч фокусируется строго в плоскости фокуса микроскопа в маленькую точ-

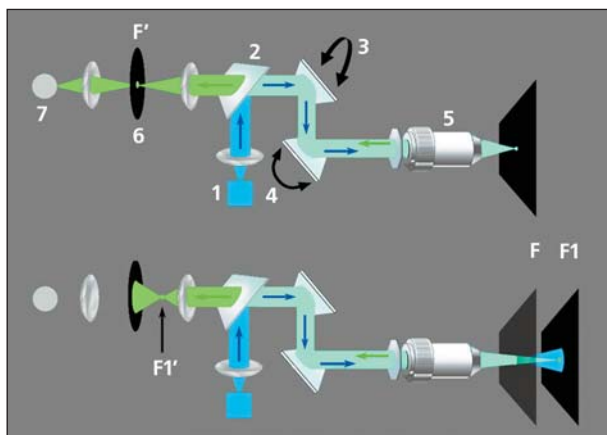


Рис.2. Принцип лазерного сканирующего конфокального микроскопа. Луч синего лазера (1) проецируется на светоделительную пластину-бимсплиттер (2), которая отражает синие лучи и пропускает зеленые, отражается от нее, проходит последовательно два сканирующих зеркала (3, 4), идет в объектив микроскопа (5) и фокусируется в очень маленькое ограниченное дифракцией пятно в плоскости фокуса объекта (F). Возбужденная зеленая флуоресценция из точки в плоскости фокуса проходит через объектив, сканирующие зеркала и бимсплиттер и проецируется в центр конфокальной диафрагмы-пинхол (6), сопряженной с плоскостью фокуса (F'). Пройдя за пинхол, свет проецируется на фотодетектор (7), измеряющий яркость свечения флуорохрома в ограниченном дифракцией пятне. Светящаяся структура, расположенная в плоскости F1 вне плоскости фокуса F, проецируется в плоскость F1', отличную от плоскости F', и свет от нее не проходит за пинхол. Таким образом, отсекается флуоресценция всех структур вне плоскости фокуса.

ку, называемую ограниченным дифракцией пятном (те самые 200 нм). По команде компьютера электромоторы перемещают луч (один вдоль оси X, другой вдоль оси Y), и это маленькое пятно может свободно двигаться в плоскости фокуса XY.

Если в объекте есть молекулы флуорохрома, а длина волны лазера соответствует таковой света, возбуждающего свечение такого вещества, то в точке, в которой находится это пятно, флуорохром начнет светиться. Однако светиться он будет не только в этой точке (называемой фокальным объемом), но также и выше, где луч был еще расфокусирован, и ниже, где луч уже расфокусирован. Таким образом, флуорохром будет светиться в фокальном объеме и внутри двух конусов, которые сходятся в нем вершинами.

Свет от флуорохрома через объектив и оптическую систему микроскопа проецируется в очень маленькое отверстие диафрагмы, называемой пинхол (pinhole — игольчатая дыра), которая расположена в плоскости, точно сопряженной с плоскостью фокуса. Диаметр пинхола чуть меньше или равен диаметру ограниченного дифракцией пятна (разумеется, после того, как его увеличил объектив микроскопа; в реальности он равен приблизительно 100 мкм). В чем смысл этой диафрагмы? Свет из точки в плоскости фокуса придет в центр ее отверстия в виде точки и пройдет сквозь пинхол, а свет из любой точки вне этой плоскости (из конусов) придет в виде размытого пятна, и пинхол его остановит. Значит, за него пройдет только свет из фокального объема, а любое свечение из конусов выше и ниже плоскости фокуса будет отрезано. Позади диафрагмы стоит фотодетектор, который преобразует свет в электрический ток, пропорциональный силе света, затем электронная схема оцифрует это значение и запишет в память компьютера. Таким образом, яркость свечения флуорохрома будет зарегистрирована только в фокальном объеме (разумеется, на пути к диафрагме-пинхол соответствующий фильтр отсекает свет лазера, отраженный от объекта, и любой другой свет, не относящийся к флуорохром). После этого сканирующее зеркало передвинет луч лазера, фотодетектор зарегистрирует яркость испускаемого флуорохромом света в соседней точке, луч лазера снова передвинется... и так до тех пор, пока точка за точкой не будет просканировано свечение флуорохрома в плоскости фокуса. После этого компьютер слегка перефокусирует микроскоп на другую плоскость фокуса (Z), и все начнется сначала. Сканирование будет продолжаться, пока не считаются все плоскости фокуса (оптические срезы) внутри заданного исследователем объема. Записанная в компьютер информация позволит затем строить трехмерное изображение светящегося объекта. Подробнее о конфокальной микроскопии см.: [2].

Однако к решению второй проблемы — дифракционного предела — удалось приблизиться

лишь в начале XXI в. Первым, кто сумел его обойти, и был Хелль. На основе лазерного сканирующего конфокального микроскопа он создал систему, которую назвал микроскопом стимулированного подавления эмиссии STED (Stimulated Emission Depletion) [3–5]. Оказалось, что свечением многих флуорохромов можно управлять. Если луч лазера определенной длины волны вызывает возбуждение молекул флуорохрома, сопровождающееся испусканием фотонов, то луч лазера другой, также определенной длины волны подавляет этот процесс, не давая фотонам вылететь. В лазерном сканирующем конфокальном микроскопе STED задействовано два лазера, которые строго синхронно во времени фокусируются в одном фокальном объеме, причем один из лазеров возбуждает свечение флуорохрома, а второй его подавляет (рис.3). Первый луч фокусируется в фокальном объеме в виде пятна, а второй, проходя сквозь специальную оптическую систему, превращается из пятна в «бублик» (в реальности луч делится на четыре пятна, расположенных по кругу так, что в центре остается маленькое «отверстие», где лазерное излучение отсутствует). Чем больше мощность лазерного излучения, тем меньше это центральное пятно.

Таким образом, когда два наложенных друг на друга лазерных луча сфокусируются в объекте, молекулы флуорохрома будут светиться не во всем фокальном объеме, а только в маленькой его части, в центре «бублика». И хотя пятно возбужденного света, пройдя через объектив микроскопа на пинхол, все равно будет не меньше ограниченного дифракцией размера (те самые 200 нм), поскольку дифракционный предел никуда не делся, зная мощность лазера, подавляющего флуоресценцию, компьютер легко рассчитает реальный диаметр пятна, из которого вылетели фотоны. Чем меньше это пятно, тем выше разрешающая способность микроскопа STED, которая больше не ограничена дифракционным пределом и зависит только от мощности лазера, подавляющего испускание фотонов. Разумеется, эту мощность нельзя увеличивать до бесконечности, поскольку в какой-то момент биологический объект просто разрушится. В реальности микроскоп STED позволяет получить разрешение до 20 нм [6], что на порядок меньше дифракционного предела (рис.4)!

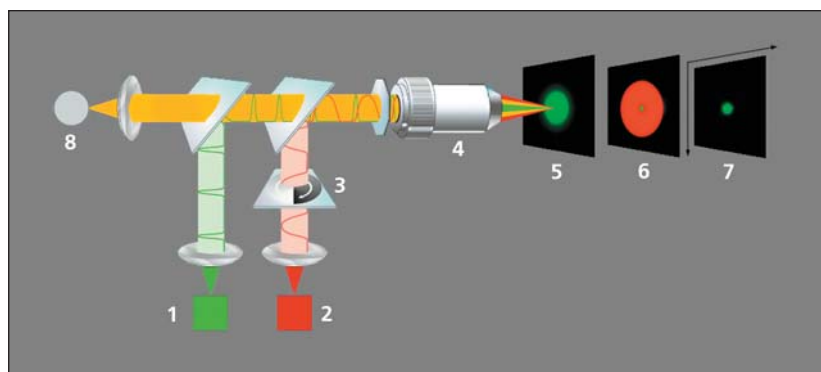


Рис.3. Принцип микроскопа STED. Улучшение разрешения достигается за счет уменьшения пятна флуоресценции в конфокальном лазерном сканирующем микроскопе при использовании двух лазеров. Первый, зеленый лазер (1) возбуждает флуорохром в образце аналогично тому, как это происходит в обычном конфокальном микроскопе (сканирующие зеркала не показаны). За импульсами возбуждающего лазера следуют импульсы красного STED лазера (2). Луч красного лазера проходит через фазовый фильтр (3), превращающий пятно в «бублик». Пройдя через объектив (4), луч возбуждающего лазера вызывает свечение флуорохрома внутри ограниченного дифракцией пятна (5). STED лазер приводит к истощению возбужденных молекул флуорохрома, что подавляет их возбуждение до того, как они испустят свет. Поскольку истощающий луч имеет форму бублика (6), флуоресценция подавляется только по внешней окружности пятна. В результате эмиссия фотонов происходит только в маленькой точке в центре пятна (7), и ее яркость регистрируется фотодетектором (8). Сканирование объекта этой точкой обеспечивает сверхразрешение. Чем больше мощность лазера STED, тем меньше размер центрального пятна и выше пространственное разрешение системы.

<http://www.activemotif.com/catalog/627/sted-microscopy-products>

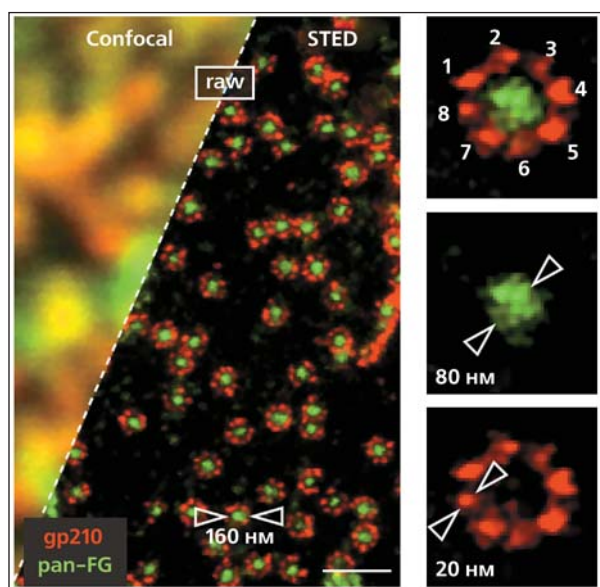


Рис.4. Сравнение изображений комплексов ядерных пор в культуре клеток ксенопуса, окрашенных антителами против белков gp210 (красный) и pan-FG (зеленый), полученных в конфокальном (вверху слева) и STED (внизу справа) микроскопах. STED позволил получить разрешение 20 нм. Возбуждение флуоресценции лазерами 595 и 640 нм, STED лазер 775 нм. Линейка 500 нм [7].

Два других лауреата пошли по иному пути. Мернеру первому удалось увидеть одиночные молекулы флуорофора в плотной среде [7]. Его результаты показали, что регистрация отдельных молекул возможна, и тем самым значительно активизировали исследования в этой области. В 1995 г. Бетциг предположил, что регистрировать отдельные светящиеся молекулы можно, определяя центры их пятен рассеяния [8]. Допустим, нам известно, что во флуоресцентном микроскопе зарегистрированное фотокамерой пятно размером, ограниченным дифракцией (приблизительно 200 нм), образовано фотонами, вылетевшими из одиночной возбужденной молекулы флуорохрома. Тогда можно определить центр этого пятна, т.е. положение светящейся молекулы. Если заставить флуоресцентные молекулы вспыхивать по очереди, а потом сложить полученные центры пятен, то разрешение результирующего изображения будет намного превышать оптическое разрешение микроскопа. Но как это сделать?

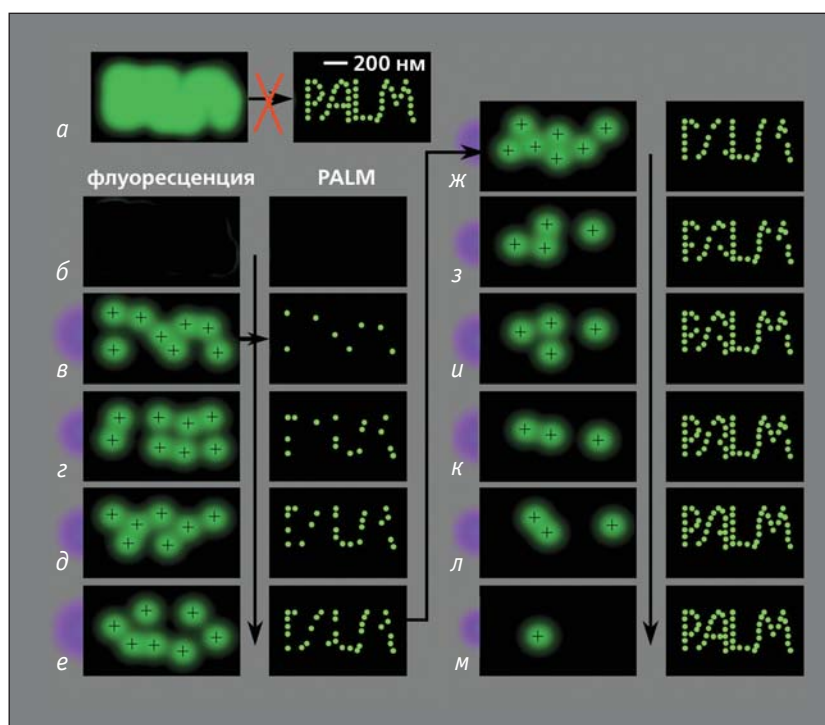


Рис.5. Принцип технологии PALM. Надпись «PALM», сделанную молекулами флуоресцентного белка, расстояние между которыми меньше дифракционного предела, увидеть невозможно, поскольку ограниченные дифракцией пятна накладываются друг на друга (а). Молекулы фотоактивируемого белка неактивны и не флуоресцируют (постоянное освещение возбуждающим светом) — локализовать молекулы невозможно (б). Импульс слабого активирующего света (фиолетовый) активирует небольшое количество молекул, которые вспыхивают под постоянным возбуждающим светом и инактивируются. EMCCD камера регистрирует пятна, ограниченные дифракцией (слева), компьютер определяет локализацию молекул (черные крестики) и начинает строить изображение сверхразрешения (в). Цикл активация-считывание-инактивация повторяется много раз, пока все молекулы не будут зарегистрированы (г—м).

В 1997 г., изучая физико-химические свойства химерного (генетически измененного) зеленого флуоресцентного белка (green fluorescent protein, GFP), Мернер с коллегами обнаружили, что его свечением можно управлять [9]. При возбуждении светом 488 нм белок начинал «моргать»: несколько раз вспыхивал и переходил в стабильное темновое (неактивное) состояние. Но самым удивительным было то, что при освещении светом 405 нм белок вновь возвращался в активное состояние. Так впервые было показано, как посредством света можно управлять состоянием флуоресцентных белков, переключая их из неактивного состояния в активное и обратно за счет их фотохимической изомеризации.

Открытие Мернера послужило стимулом для создания химерных белков с новыми оптическими свойствами. Синтез таких фотоактивируемых белков стал решающим шагом для появления целого ряда микроскопических методов сверхвысокого разрешения. Вскоре после открытия Мернера был получен еще один химерный вариант GFP. Изначально неактивный, он активировался светом 413 нм, после чего начинал светиться при возбуждении светом 488 нм и сразу необратимо инактивировался [10].

Используя этот белок, Бетциг и реализовал предложенный им ранее метод флуоресцентной микроскопии, названный PALM (Photoactivation Localization Microscopy — микроскопия локализованной фотоактивации) [11]. Принцип его действия состоит в следующем: исследуемые структуры метят фотоактивируемым химерным белком GFP (все его молекулы находятся в неактивном состоянии) и помещают под флуоресцентный микроскоп (рис.5). Объект освещается очень слабым светом 413 нм, который активирует (включает) молекулы белка, но лишь небольшое их число. При этом мощность света подбирается так, чтобы расстояние между соседними молекулами было заведомо больше дифракционного предела. Затем мощный свет 488 нм возбуждает активированные молекулы, заставляет их вспыхивать и снова выключаться. Пятна света фиксирует регистрирующее устройство (CCD-камера), каждое из них ограничено дифракционным пределом. Но по-

сколькo источником света для каждого пятна слyжит одиночная молекула белка, то компьютер вычисляет центр пятна и помещает его в виде точки в результирующее изображение. Затем процесс повторяется снова (при этом вспыхнут другие молекулы) и снова, пока не будет зарегистрирована информация обо всех молекулах фотоактивируемого белка.

Аналогичный метод микроскопии сверхразрешения разработала в Гарвардском университете Сяоуей Жуанг (Ziaowei Xhuang) с двумя студентами, используя не фотоактивируемые белки, а стандартные флуорохромы [12]. Исследователи обнаружили, что некоторые цианиновые флуоресцентные красители также фотопереклюцаемы, т.е. с помощью света различной длины волны их можно переводить в активное или неактивное (темновое) состояние, в котором они не отвечают на возбуждение светом. Авторами метод назван микроскопией стохастической оптической реконструкции (Stochastic Optical Reconstruction Microscopy, STORM). Суть его в следующем: молекулы красителя (например Cy5) поочередно переводятся в неактивное состояние ярким красным светом, небольшая часть их активируется слабым зеленым светом, затем сильный красный свет заставляет активированные молекулы вспыхнуть и снова инактивироваться, слабый зеленый свет снова активирует часть молекул... и так далее. Поскольку метод Жуанг с соавторами был опубликован на месяц (!) позже статьи Бетцига, Нобелевская премия досталась ему.

Жуанг с коллегами обнаружили еще одну интереснейшую вещь: оказалось, что красители можно объединять в пары [13], состоящие из фотоактивируемого ответчика (reporter) и активатора (activator). Первый может переключаться между активным и неактивным (темновым) состоянием,

а второй переводит ответчика в активное состояние. Например в паре активатор/ответчик Cy2/Cy5 сначала яркий красный свет переводит все молекулы ответчика Cy5 в темновое состояние, затем очень слабый синий возбуждает небольшое число молекул активатора Cy2, которые в свою очередь активируют молекулы ответчика, каждая в своей паре. Затем яркий красный свет вызывает свечение этих молекул ответчика и вновь переводит их в темновое состояние. Далее, аналогично методу PALM, все повторяется снова. Достоинство этого метода в том, что если использовать несколько пар, в которых ответчик будет одним и тем же, а активаторы разные, то можно в одном и том же объекте регистрировать несколько разных структур, не теряя при этом сверхразрешения. Понятно, что использование в одном объекте флуорохромов разного цвета для регистрации высокого разрешения невозможно из-за хроматических аберраций в оптической системе.

Пространственное разрешение микроскопа PALM или STORM не зависит от самого микроскопа и лимитировано только тем, с какой точностью регистрирующая система определит центр пятна, ограниченного дифракцией. Иными словами, разрешение зависит только от чувствительности фотокамеры и мощности компьютера. Уже сейчас такие микроскопы позволяют получить разрешение в 20–30 нм (рис.6), а в дальнейшем с появлением более чувствительных регистрирующих устройств (CCD-камер) и более мощных компьютеров оно будет постепенно улучшаться.

В заключение нельзя не упомянуть еще одного человека, который по праву должен был занять место в ряду лауреатов Нобелевской премии 2014 г. за разработку микроскопии сверхвысокого

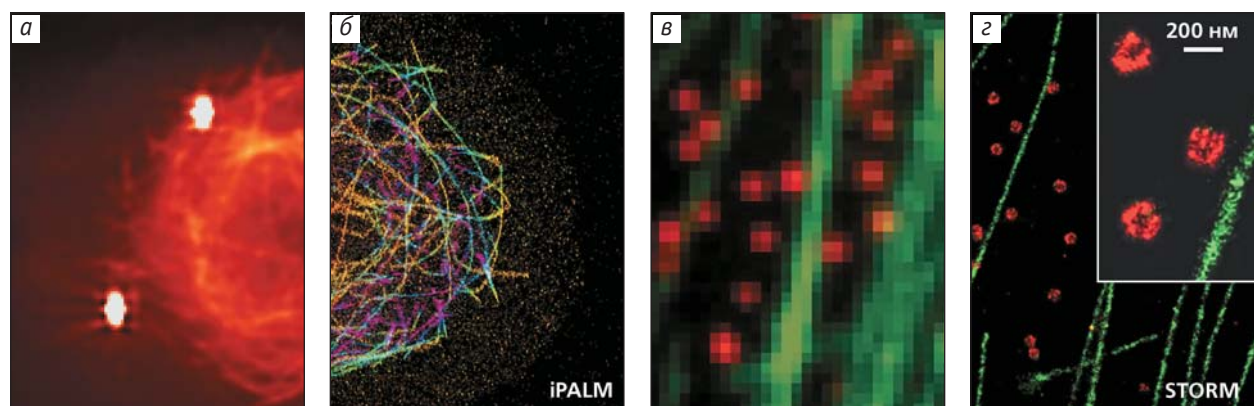


Рис.6. Сравнение изображений, полученных разными методами микроскопии. Изображения микротрубочек, связанных с фотопереклюцаемым белком в клетке, полученные во флуоресцентном (а) и PALM (б; показано трехмерное изображение в цветовой кодировке расположения по оси Z) микроскопах. Изображения экспрессирующих α -тубулин микротрубочек и покрытых клатрином пор в клетке BS-C-1, окрашенных антителами и помеченных парами флуорохромов Cy2/Alexa647 (показано зеленым) и Cy3/Alexa647 (показано красным), полученные во флуоресцентном (в) и STORM (г) микроскопе.

http://www.33rdsquare.com/2013/06/new-microscopy-techniques-reveals-inner_19.html

разрешения. Это Матц Густафссон (Mats Gustafsson), физик и инженер из кампуса «Джанелия» при Медицинском институте Говарда Хьюза, который предложил систему структурированного освещения (Structured Illumination Microscopy, SIM). Объект через специальную решетку освещается серией структурированных пучков возбуждающего света, и это позволяет регистрировать мелкие недоступные из-за дифракционного барьера детали как некий более «грубый» муар, возникающий из-за наложения структуры освещения на структуру объекта [14, 15]. Этот простой и элегантный метод позволил повысить оптическое разрешение микроскопа вдвое — с 200 до 100 нм. Густафссон скончался в 2011 г. на 52-ом году жизни, а Нобелевская премия присуждается лишь здравствующим ученым.

История микроскопии сверхвысокого разрешения только начинается. Микроскопию стимулированного подавления эмиссии (STED) изоб-

рели в 2000 г., а микроскопию фотоактивации (PALM и STORM) — в 2006-ом. Несмотря на это, методы сверхразрешения уже активно используются практически во всех областях биологии: в клеточной и молекулярной биологии, микробиологии, нейробиологии и т.д., а также в медицинских исследованиях. Впервые появилась возможность «заглянуть» глубоко внутрь живой клетки и увидеть недоступные ранее структуры и процессы. Дальнейшее развитие такой техники вне всякого сомнения вызовет революцию в биологии и медицине, поскольку стало реальным наблюдать, адекватно регистрировать и изучать как качественно, так и количественно сложные молекулярно-биологические процессы, происходящие в наномире живой клетки.

© Л.П.Незлин,

доктор биологических наук

Институт биологии развития им.Н.К.Кольцова РАН
Москва

Литература

1. *Abbe E.* Beiträge zur Theori des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung // Archiv für mikroskopische Anatomy. 1873. Bd.9. St.413—418.
2. *Мухитов А.Р., Архипова С.С., Никольский Е.Е.* Современная световая микроскопия в биологических и медицинских исследованиях. М., 2011.
3. *Hell S.W., Wichmann J.* Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion-microscopy // Opt. Lett. 1994. V.19. P.780—782.
4. *Hell S.W., Kroug M.* Ground-state depletion fluorescence microscopy, a concept for breaking the diffraction resolution limit // Appl. Phys. B. 1995. V.60. P.495—497.
5. *Klar T.A., Jakobs S., Dyba M. et al.* Fluorescence microscopy with diffraction resolution barrier broken by stimulated emission // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2000. V.97. P.8206—8210.
6. *Göttfert F., Christian A. Wurm C.A. et al.* Coaligned dual-channel STED nanoscopy and molecular diffusion analysis at 20 nm resolution // Biophysical Journal. 2013. V.105. P.L01—L03
7. *Moerner W.E., Kador L.* Optical detection and spectroscopy of single molecules in a solid // Phys. Rev. Lett. 1989. V.62. P.2535—2538.
8. *Betzig E.* Proposed method for molecular optical imaging // Opt Lett. 1995. V.20. P.237—239.
9. *Dickson R.M., Cubitt A.B., Tsien R.Y., Moerner W.E.* On/off blinking and switching behaviour of single molecules of green fluorescent protein // Nature. 1997. V.388. P.355—358.
10. *Patterson G.H., Lippincott-Schwartz J.* A photoactivatable GFP for selective photolabeling of proteins and cells // Science. 2002. V.297. P.1873—1877.
11. *Betzig E., Patterson G.H., Sougrat R. et al.* Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution // Science. 2006. V.313. P.1642—1645.
12. *Rust M.J., Bates M., Zhuang Xiaowei.* Sub-diffraction-limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (STORM) // Nature Methods. 2006. V.3. №10. P.793—795.
13. *Bates M., Huang B., Dempsey G.T., Zhuang Xiaowei.* Multicolor super-resolution Imaging with photo-switchable fluorescent probes // Science. V.317. P.1749—1753.
14. *Gustafsson M.G.* Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy // J. Microsc. 2000. V.198. P.82—87.
15. *Gustafsson M.G.* Non-linear structured-illumination microscopy: wide-field fluorescence imaging with theoretically unlimited resolution // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2005. V.102. P.13081—13086.

По физиологии или медицине — Дж.О'Киф, М.-Б.Мозер, Э.Мозер

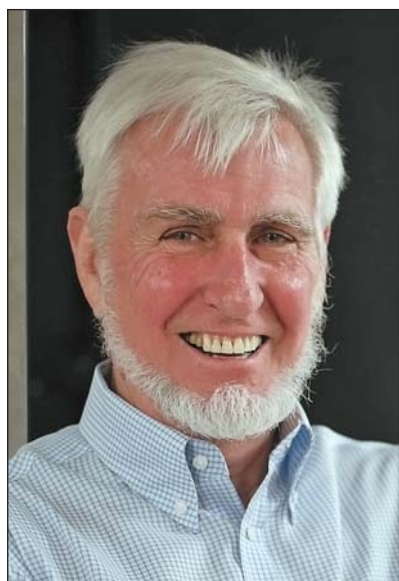
По формулировке Нобелевского комитета, в 2014 г. премия по физиологии или медицине присуждена «за открытие клеток, из которых в головном мозге построена система контроля позиционирования тела в пространстве». Премию разделили пополам между нейробиологами: одну часть получил Джон О'Киф, другую — супруги Эдвард и Мэй-Бритт Мозер.

Джон О'Киф (John O'Keefe) родился в 1939 г. в Нью-Йорке в семье ирландских эмигрантов и имеет двойное гражданство — США и Великобритании. В 28 лет получил докторскую степень по психофизиологии в Университете им.Дж.МакГилла (McGill University, Канада). С 1967 г. работает в Университетском колледже Лондона (University College London, UCL): в 1987 г. стал профессором Института когнитивной неврологии и биологии развития, в 2013 г. назначен директором нового научно-исследовательского центра (Sainsbury Wellcome Centre in Neural Circuits and Behaviour at UCL). За выдающийся вклад в нейробиологию награжден премиями Британской ассоциации нейробиологов (2007) и Федерации европейских нейробиологических обществ (2008), а также именными премиями — Вильгельма Фельдберга (2001), Чарльза Грейвмейера (2006), Питера Грубера (2008), Луизы Гросс Хорвиц (2013) и Фреда Кавли (2014).

Мэй-Бритт Мозер (May-Britt Moser) родилась в 1963 г. в Фоснаваге (Норвегия). Вместе с будущим мужем Эдвардом Мозером изучала психологию в Университете Осло (University of Oslo), где в 1995 г. получила степень по нейрофизиологии. Затем работала в Эдинбургском университете (University of Edinburgh), в Университетском колледже Лондона и в Норвежском университете науки и технологий в Тронхейме (Norwegian University of Science and Technology), где в 2000 г. стала профессором неврологии и в настоящее время возглавляет Центр нейрокомпьютерных вычислений (Centre for Neural Computation).

Эдвард Мозер (Edvard I. Moser) родился в 1962 г. в Элесунде (Норвегия). Как и его супруга, в 1995 г. получил степень по нейрофизиологии в Университете Осло, после чего вместе с Мэй-Бритт занимался исследованиями в Эдинбургском университете, а затем в лаборатории О'Кифа в Лондоне. В 1996 г. вернулся на родину, работал в Норвежском университете науки и технологий, где в 1998 г. стал профессором и теперь руководит Институтом системной неврологии им.Ф.Кавли (Kavli Institute for Systems Neuroscience).

Научные заслуги Мозеров отмечены многочисленными наградами: премиями Луи-Жанета (2011), Луизы Гросс Хорвиц (2013, вместе с О'Кифом), Карла Спенсера Лэшли (2014) и др.



Джон О'Киф.



Мэй-Бритт Мозер.



Эдвард Мозер.

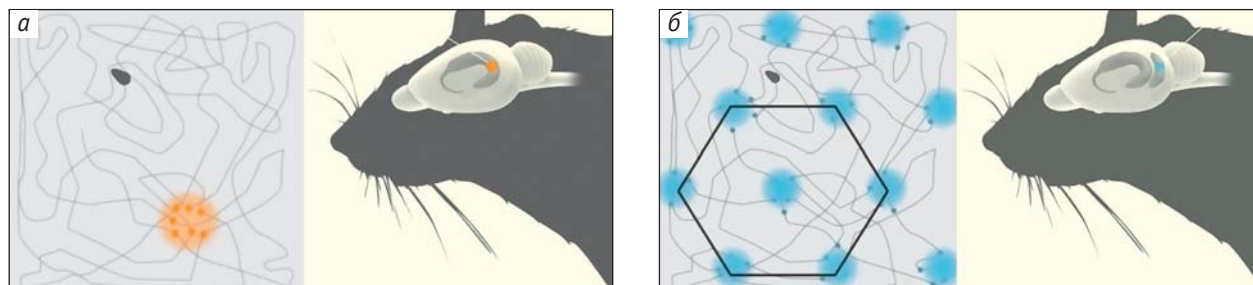
Как мы определяем, где находимся, и прокладываем путь от одного места до другого? Каким образом хранится новая информация, помогающая нам вспомнить дорогу, если мы хотя бы раз по ней ходили? Оказалось, что ориентироваться нам в пространстве нам позволяет некая нейронная основа для высших функций мозга, своего рода «внутренняя GPS», — глобальная система контроля позиционирования тела в пространстве, открытая нобелевскими лауреатами 2014 г. Чтобы обратиться к истокам этой работы, вернемся в 1971 г., когда молодой О'Киф описал первый компонент этой системы в статье «Гиппокамп как пространственная карта», опубликованной в ведущем тогда журнале «Brain research» [1].

Гиппокамп (древняя структура мозга, часть «старой коры», расположенная в медиальных височных отделах полушарий и связанная с пространственной памятью) тогда только начал привлекать внимание ученых, в том числе и наших соотечественников. В нашей стране появились публикации О.С.Виноградовой — ученицы основоположника отечественной психофизиологии Е.Н.Соколова, под руководством которого, в частности, были открыты так называемые «командные нейроны» [2], выполняющие функции особого центра принятия решений. В 1969 г. Виноградова основала лабораторию системной организации нейронов в Институте биологической физики АН СССР (Пушчино), где были получены уникальные результаты о механизмах обработки информации в гиппокампе. Чуть позже она сформулировала концепцию роли гиппокампа как структуры для сравнения текущей информации и хранящейся в памяти [3]. Фактически новое представление о механизмах работы мозга развил выдающийся психофизиолог В.Б.Швырков, основавший в Институте психологии АН СССР лабораторию нейрофизиологии обучения (ныне лаборатория нейрофизиологических основ психики им.В.Б.Швыркова). Вместе с коллегами он установил возможность системной специализации нейронов, что открыло совершенно новые возможности экспериментального ис-

следования индивидуального опыта человека и животных [4].

О существовании в головном мозге некой навигационной карты впервые задумался американский психолог Э.Толмен [5]. Он проанализировал ориентацию крыс в лабиринте и предположил, что в ходе приобретения опыта и обучения в головном мозге формируются «когнитивные карты», на основе которых и происходит уверенная ориентация после обучения. Однако основной вопрос, каким образом и в каких областях мозга формируются эти карты пространства, оставался открытым.

О'Киф задался целью описать, как, собственно, мы ориентируемся в пространстве, ощущаем свое местоположение. Еще в конце 1960-х годов он начал проводить эксперименты, направленные на изучение того, как именно мозг крыс контролирует их поведение. В то время регистрировать активность одиночных клеток (особенно в подкорковых образованиях) у свободно движущихся животных было очень трудно. О'Киф воспользовался новой для того времени методикой вживленных электродов для записи сигналов, которые поступают от нервных клеток, расположенных в гиппокампе. Исследователь обнаружил, что различные нейроны гиппокампа активируются, когда крыса находится в строго определенных местах комнаты, при этом активность каждого конкретного нейрона была связана с определенным местом (рис.1,а). О'Киф пришел к выводу, что нейроны гиппокампа, которые он назвал «клетками места» (по-англ. — place cells, по-русски их также называют пространственными клетками), кодируют пространственные карты в мозге [6]. Далеко не все исследователи были согласны с такой интерпретацией результатов; большинство склонялось к тому, что происходит регистрация зрительной информации, и клетки реагируют именно на нее. Однако О'Киф смог доказать, что пространственные клетки не просто активируются специфическим зрительным входом, который соответствует данному местоположению, а являются элементами создаваемой в мозге когнитивной карты внешнего мира.



Активность нейронов (а — «клеток места», и б — «решетки»), реагирующих на перемещения крысы. Справа на каждом рисунке схематично изображен ее мозг, где оранжевым цветом отмечен гиппокамп, голубым — энториальная кора. Слева на схемах линиями показаны пути движения крыс. Видно, что «клетка места» активируется, только когда животное находится в одном определенном месте помещения (оранжевые точки), а «клетка решетки» разряжается при прохождении определенных позиций, образующих пространственную решетку (голубые точки).

Зная привязку активности нейронов к этим местоположениям, О'Киф определил траекторию движения крысы исключительно по последовательности активации нейронов, и эта траектория полностью совпала с реальным передвижением крысы в пространстве. О'Киф считал, что в гиппокампе генерируются многочисленные карты пространства, отражение существования которых можно увидеть в коллективной активности «клеток места», активирующихся в разных обстановках. Таким образом, память об обстановке может храниться как специфическая комбинация активности «клеток места» гиппокампа.

Открытие пространственных клеток стало основой для последующих исследований того, как эти клетки активируются и каким образом создаются моментальные когнитивные образы за счет коллективной активности «клеток места» во время осцилляций в нейрональных сетях. Процесс возникновения и закрепления в памяти «клеток места» стал клеточной моделью для исследований процессов памяти и обучения. В настоящее время «клетки места» обнаружены и у человека. Их активация происходит при перемещении не только в реальном мире, но и в виртуальном пространстве, например во время компьютерных игр.

В последующие годы О'Киф многократно и разными путями подтвердил свои данные, и они фактически вошли в учебники. В его лабораторию стремились многие молодые исследователи. В их числе в 90-х годах оказался и Эдвард Мозер, который спустя 34 года вместе с Мэй-Бритт опубликовал блестящее продолжение исследований О'Кифа [7]. Супруги обнаружили, что активность нейронов энторинальной коры, которая занимает особое место в системе связей гиппокампа, также отражает положение тела в пространстве. Этот участок коры, получающий многочисленные входы практически от всех областей неокортекса

и других отделов головного мозга (миндалин, передних ядер таламуса и др.), — основной источник информации, поступающей в гиппокамп. Мозерам удалось описать другой тип нейронов — «клетки решетки» (grid cells), которые реагировали на продвижение животного на четко определенное расстояние и в определенном направлении [8]. Эти клетки как бы имеют возможность отсчитать на гексагональной решетке, на сколько и куда продвинулось животное (Рис.1,б). Клетки решетки вместе с другими клетками энторинальной коры, реагирующими на направление движения головы, приближение к границам пространства, и «клетками места» гиппокампа образуют систему позиционирования тела в пространстве [9].

Недавно результаты исследований, проведенных во время нейрохирургических операций, подтвердили существование аналогичных систем у людей. Более того, выяснилось, что у пациентов, страдающих болезнью Альцгеймера и не способных ориентироваться в пространстве, довольно часто уже на ранних стадиях болезни поражены гиппокамп и энторинальная кора [10]. Знание механизмов позиционирования тела в пространстве, возможно, поможет в поиске путей компенсации когнитивного дефицита у таких больных.

Таким образом, чисто фундаментальные работы нобелевских лауреатов по описанию системы позиционирования тела в пространстве не только привели к существенному изменению представлений о том, как работа ансамблей специализированных нейронов обеспечивает высшие когнитивные функции, но и открыли новые пути для понимания таких сложных процессов, как память, мышление и планирование.

© Балабан П.М.,

доктор биологических наук

Институт высшей нервной деятельности РАН

Москва

Литература

1. O'Keefe J., Dostrovsky J. The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat // *Brain Res.* 1971. V.34. №1. P.171—175. doi:10.1016/0006-8993(71)90358-1
2. Balaban P.M. A system of command neurons for avoidance behavior of the snail *Helix lucorum* // *Acta Neurobiol. Exper.* 1979. V.39. №2. P.97—107.
3. Виноградова О.С. Гиппокамп и память, М., 1975.
4. Швырков В.Б. Нейрофизиологические механизмы поведения / Ред. Б.Ф.Ломов, Р.Ф.Томпсон, В.Б.Швырков. М., 1982.
5. Tolman E.C. Cognitive maps in rats and men // *Psychol. Rev.* 1948. V.55. P.189—208.
6. O'Keefe J. Place units in the hippocampus of the freely moving rat // *Experimental Neurology.* 1976. V.51. P.78—109.
7. Fybn M., Molden S., Witter M.P. et al. Spatial representation in the entorhinal cortex // *Science.* 2004. V.305. P.1258—1264. doi:10.1126/science.1099901
8. Hafting T., Fybn M., Molden S. et al. Microstructure of spatial map in the entorhinal cortex // *Nature.* 2005. V.436. P.801—806. doi:10.1038/nature03721
9. Sargolini F., Fybn M., Hafting T. et al. Conjunctive representation of position, direction, and velocity in the entorhinal cortex // *Science.* 2006. V.312. P.758—762. doi:10.1126/science.1125572
10. Khan U.A., Liu L., Provenzano F.A. et al. Molecular drivers and cortical spread of lateral entorhinal cortex dysfunction in preclinical Alzheimer's disease // *Nature Neuroscience.* 2014. V.17. P.304—313. doi:10.1038/nn.3606

Российские исследователи Латинской Америки

Ю.Н.Вавилов,

доктор физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
Москва

Э.В.Трускинов,

кандидат биологических наук
Всероссийский НИИ растениеводства им.Н.И.Вавилова РАСХН
Санкт-Петербург

М.Е.Раменская,

кандидат геолого-минералогических наук,
Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

О российских географических открытиях в Латинской Америке известно меньше, чем о русских экспедициях в Северную Америку или об освоении русскими Аляски и Калифорнии. Тем и ценна книга «Великие русские экспедиции», вышедшая недавно (в двух вариантах: подарочном и коммерческом) под эгидой Русского географического общества.

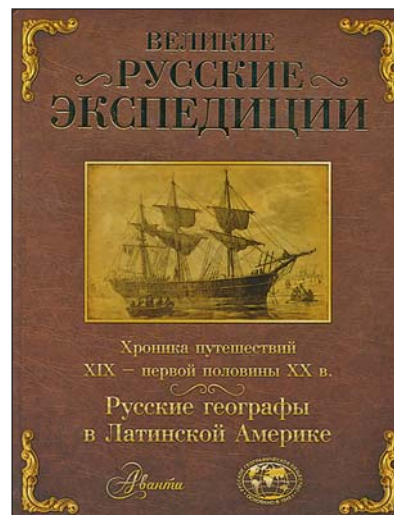
Коллектив авторов этой книги — современные путешественники, которые хорошо знают Латинскую Америку. При подготовке очерков они использовали материалы архивов, хранящих полевые дневники, фотографии, документы, а также опубликованные путевые заметки путешественников. Всего в книге 14 глав. Первая из них посвящена пяти российским кругосветным плаваниям: И.Ф.Крузенштерна и Ю.Ф.Лисянского, В.М.Головина, М.П.Лазарева, О.Е.Коцебу, Ф.П.Литке. Остальные главы повествуют об отдельных экспедициях с описанием маршрутов, условий работы исследователей; здесь приведены отрывки из их дневников и подведены итоги исследований. Все статьи об экспедициях снабжены биографиями их главных участников, что существенно дополняет книгу.

© Вавилов Ю.Н., Трускинов Э.В.,
Раменская М.Е. 2015

Так, из короткой биографии Коцебу мы узнаем, что он впервые обнаружил в Америке ископаемый лед с бивнем мамонта, описал североамериканских эскимосов. Он также первым выдвинул гипотезу происхождения коралловых атоллов, позднее разработанную Дарвином. К сожалению, об этом ничего нет в самом очерке о плавании, т.е. биография в этом отношении оказывается более информативной.

Помимо пяти упомянутых экспедиций (глава 1), морскими были еще две — А.В.Вышеславцева (глава 5) и С.О.Макарова (глава 8). Это не мешало их участникам детально описывать окрестности бухт, портовых городов и сами порты, где останавливались их корабли для пополнения запасов провизии и воды, либо для ремонта судов, собирать коллекции насекомых и гербарии, делать зарисовки. Остальные 11 экспедиций были посвящены исследованиям территорий Латинской Америки. Едва ли не самое большое внимание исследователи XIX в. отдавали этнографии, но не меньше сделали биологи, зоологи и ботаники, а иногда экспедиции изначально и целенаправленно носили биологический характер (главы 13 и 14).

Особенно плодотворной была коллекционная деятельность Георга (Григория Ивановича)



ВЕЛИКИЕ РУССКИЕ ЭКСПЕДИЦИИ: ХРОНИКА ПУТЕШЕСТВИЙ XIX — ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ XX В. РУССКИЕ ГЕОГРАФЫ В ЛАТИНСКОЙ АМЕРИКЕ / Ред. А.С.Наумов

М.: АСТ, 2014. 376 с.

фон Лангсдорфа, выдающегося географа, биолога, этнографа, отдавшего лучшие годы жизни дипломатической службе Российской империи (глава 2). Исполняя должность генерального консула, а затем и функции поверенного при португальском дворе в Рио-де-Жанейро, он много внимания и сил уделял сбору и коллекционированию ботанического материала. Из-за служебной занятости Лангсдорф нередко привлекал и других исследователей, путешествующих по Бразилии. Так, в одном из его экспедиционных отчетов, отправляемых в Петербург, сообщается, что Л.Ридель «собрал, описал и засушил 500—600 новых растений и составил коллекцию редких семян» (с.115). Сам же Лангсдорф сделал описание около 90 видов растений, распространенных в разных частях мира, поскольку еще до службы в Бразилии он немало путешествовал, в том числе на корабле «Надежда» во время первого кругосветного русского плавания под командованием И.Ф.Крузенштерна.

Научная экспедиция 1914—1915 гг. (глава 11), организованная студентами «Г.Г.Манизером, И.Д.Стрельниковым и Ф.А.Филье-струпом по собственному почину и частью на свои средства» (с.263), провела в Аргентине, Бразилии и других странах Южной Америки почти полтора года*. Среди молодых географов и этнографов были два зоолога: И.Д.Стрельников и Н.Ф.Танасийчук. Экспедиция эта оказалась весьма продуктивной: согласно представленному отчету, из нее привезли 16 ящиков (43 пуда) коллекций по зоологии, этнографии, ботанике. Об особенностях и результатах этого плавания, а также экспедиции Г.И.Лангсдорфа в Бразилию, помимо рецензируемой книги, можно узнать из опубликованных работ одного из ее этно-

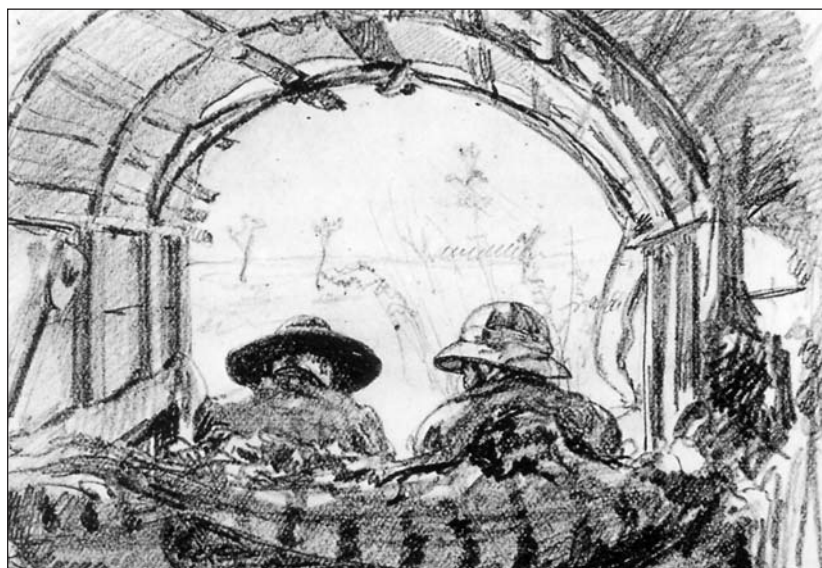


И.Д.Стрельников и Н.П.Танасийчук с индейцами каа-ы-ва. Фото 1915 г.
Здесь и далее иллюстрации из рецензируемой книги

графов — Г.Г.Манизера, брата известного советского скульптора. Еще надо особо отметить И.Д.Стрельникова, впоследствии крупного ученого и выдающегося педагога.

Но самыми известными в XX в. стали вавиловские экспедиции в Латинскую Америку. В первой (1925—1929), названной в книге ботанической, сам Николай Иванович не участвовал, но был ее идейным организатором и наставником. В книге экс-

педицию эту называют по именам двух ее участников: С.М.Букасова и Ю.Н.Воронова. К ним, безусловно, надо было добавить С.В.Юзепчука, дольше всех изучавшего страны Южной Америки. Букасов побывал в Центральной Америке — в Мексике, Гватемале и Колумбии, а Юзепчук двинулся южнее — в Боливию, Перу, Чили. Именно на этом настаивал Вавилов, и эти страны оказались наиболее интересными в отношении произрастания ряда куль-



Дилижанс до Кочура. Рисунок Г.Г.Манизера. 1914—1915 гг.

* Подробнее см.: Сахарнов С.В. История одной забытой экспедиции // Природа 2004. №11. С.85—89. — *Примеч. ред.*



Н.И.Вавилов на сельскохозяйственном рынке в Андах. 1932 г.

тур, особенно картофеля. Впоследствии Юзепчук вспоминал: «Его рекомендации были настолько определены, что если в начале своей работы я иногда сомневался в целесообразности выбираемых им маршрутов, то вскоре все мои сомнения отпали, так как всегда оказывалось, что он был прав. А ведь эти указания Вавилов дал до своей поездки в Южную Америку»*. Книга снабжена краткими биографическими данными о Юзепчуке, но он заслуживает, конечно, более развернутой биографии, учитывая его важную роль в этой экспедиции, а также то, что он побывал в Южной Америке дважды (второй раз — в Бразилии в 1947 г.). Вместе с тем очень обстоятельным и ценным представляется приложение биографии Воронова — официального руководителя и главного ботаника этой экспедиции, отправленной на средства Резинтреста. Одной из основных целей путешествия были поиск и сбор природных каучуконосов. Имя Воронова незаслуженно забыто и порой вообще не

* Из статьи И.Фрейдберга, участника экспедиции, опубликованной в сборнике «Латинская Америка в трудах и творческом наследии академика Н.И.Вавилова» (М., 1987. С.69).

приводится в научной литературе при упоминании этой экспедиции (обычно называют лишь Вавилова, Букасова и Юзепчука), что, возможно, связано со скорой смертью Воронова в 1931 г.

Одним из главных достижений той экспедиции был сбор ряда новых культурных, примитивных и диких видов картофеля. В отношении этой столь значимой для человечества культуры, называемой у нас вторым хлебом, произошло новое открытие Америки как богатейшего и ценнейшего источника мирового ее генофонда. Найденные виды начали активно вовлекать в селекцию картофеля на основе межвидовой гибридизации. Последствия русской экспедиции стали поистине революционными для дальнейшего возделывания картофеля: сегодня почти все его сорта — межвидовые гибриды. Основной причиной сильной потери урожая из-за болезней была довольно бедная наследственная природа ввезенного в Европу картофеля. Именно это привело к массовому голоду и гибели значительной части населения в Ирландии, где картофель был основным продуктом питания. Разразившаяся здесь в 40-х годах XIX в. эпифитотия нового тогда заболевания — фитофтороза — обрекла многих ирландцев на смерть или вынудила эмигрировать в ту же Америку, из которой эта болезнь пришла. Но если в природных очагах ее возникновения шел естественный отбор устойчивых генотипов среди местных сортов и видов, то в Европе отбирать было не из чего. Только благодаря обогащению генетического потенциала европейского картофеля за счет скрещивания его с американским удалось воскресить здесь эту культуру. Фитофтора и многие другие болезни и вредители при этом никуда не делись, но с ними научились бороться, в том числе и наиболее эффективными методами селекции, гибридизации и отбора. Впрочем, этот метод в основном

присущ отечественному картофелеводству, на Западе предпочитают химический, экологически небезопасный метод борьбы с фитофторой.

Дополнили эту первую ботаническую экспедицию и в чем-то ее превзошли (хотя бы по числу посещенных стран) поездки самого Вавилова в Латинскую Америку в 1930 и 1932/1933 гг. К тому времени Америка для него не была некоей terra incognita. Еще в 1921 г. он посетил США и Канаду, организовал в Нью-Йорке отделение Бюро по прикладной ботанике, позволявшее получать семена различных культур (в том числе и из Южной Америки), а также научную литературу, которую Вавилов использовал при планировании дальнейших экспедиций. В целом Николай Иванович посетил 15 стран Латинской Америки, где знакомился с научными и сельскохозяйственными учреждениями, с ведущими специалистами этих стран, лично собирал образцы разных культур (новые виды картофеля, кукурузы, хлопчатника). Одним из первых он интродуцировал в Россию хинное дерево, так необходимое для борьбы с малярией на юге страны. Конечно, для Вавилова огромным источником информации служили результаты первой экспедиции, в руководстве которой он принимал самое непосредственное участие. Все последующие вавиловские экспедиции в Латинскую Америку позволили окончательно определить центры происхождения культурных растений в Новом Свете, выделив там два основных очага — Мексиканский (Центральная Америка) и Андийский (Перу, Боливия, Эквадор).

Описание в книге экспедиций Вавилова в Латинскую Америку существенно дополняет уже имеющиеся разрозненные публикации на эту тему. Здесь же приводится много оригинальных мыслей и впечатлений Николая Ивановича, взятых из его статей, официальных отчетов и личных писем. После Вавилова, Воронова, Букасова и



Крестьяне в Гондурасе. Фото Н.И.Вавилова.

Юзепчука исследовать этот континент продолжали П.М.Жуковский, К.З.Будинный, Л.Е.Горбатенко, А.Г.Зыкин и другие сотрудники Всесоюзного института растениеводства (сейчас — Всероссийский НИИ растениеводства им.Н.И.Вавилова). Всего за 60 лет (1925—1985) туда было организовано 24 экспедиции. На основе собранного там материала в селекционную практику вошли десятки тысяч видов, сортов и гибридов сельскохозяйственных растений. Идеи Вавилова об особой ценности исходного, в том числе новосветского, материала для селекции воплотились в сотни высокопродуктивных отечественных сортов, устойчивых к экстремальным факторам среды. Сейчас уже признано, что не менее 70% селекционных достижений получено на основе собранной в ВИРе мировой коллекции генетических растительных ресурсов.

Выход книги о великих русских экспедициях в Латинскую

Америку — событие, безусловно, знаменательное и своевременное в научной географической, биологической и этнографической литературе и библиографии. Нельзя не отметить это издание и как прекрасный образец современной полиграфии. Она высокохудожественно издана, снабжена множеством прекрасных рисунков и фотографий. Правда, к сожалению, в книге мало рисунков участников экспедиций, преобладают либо более поздние фотографии упомянутых мест, животных или растений, либо иллюстрации из старинных справочников и альбомов. Имеются также репродукции картин (например, Айвазовского). Книга снабжена детальным справочным материалом. По поводу многих имен на полях приводятся годы жизни и главные сведения об упомянутом человеке. Сообщается о положении населенных пунктов, об их значении и числе жителей в наши дни, поясняются и другие географические названия, а при

необходимости и упомянутые исторические события. К каждой главе приложена карта маршрутов, но явно не достаёт более детальной их картографии, не хватает и общего для книги справочного аппарата: именного и географического указателей. В предисловии говорится, что авторы пользовались в первую очередь архивом Географического общества, но, к сожалению, в тексте ссылки на эти данные отсутствуют, а единичные упоминания архивов не содержат адреса использованного документа. Все эти мелкие замечания никак не умаляют достоинств этого издания и пожелания выпускать труды серии великих русских путешествий и дальше. Рецензируемую книгу можно рекомендовать в качестве очень полезного познавательного чтения самому широкому кругу читателей. Нельзя не отдать должное и ее авторам, выдержавшим все статьи в хорошем научно-популярном стиле. Труд читается легко и с большим интересом. ■

Правила для авторов

Журнал «Природа» публикует работы по всем разделам естествознания: результаты оригинальных экспериментальных исследований; проблемные и обзорные статьи; научные сообщения и краткие рефераты наиболее примечательных статей из научных журналов мира; рецензии; персоналии; материалы и документы по истории естественных наук. Поскольку статьи адресуются неспециалистам, желающим знать, что происходит в смежных областях науки, суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Без предварительной апробации научным сообществом статьи не принимаются, а принятые к публикации в «Природе» рецензируют-

ся и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию статьи можно прислать по электронной почте прикрепленными файлами или на любом из следующих носителей: компакт-дисках CD-R или CD-RW; дисках DVD+R или DVD+RW; дисках Zip 100 Mb; на устройствах, поддерживающих USB. Для сжатых файлов необходимо представить свой архиватор. Самораспаковывающиеся архивированные файлы не принимаются.

Текст статьи, внутри которого библиографические ссылки нумеруются по мере цитирования, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате MS с расширением doc, txt или rtf. Иллюстрации присылаются отдельными файлами. Если пере-

сылаемый материал велик по объему, следует архивировать его в формат ZIP или RAR.

Принимаются растровые изображения в форматах: EPS или TIFF — без LZW-компрессии. Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (B/W, Bitmap) — не менее 800 dpi. Принимаются векторные изображения в формате COREL DRAW CDR (версии 9.0—11.0) и Adobe Illustrator EPS (версий 5.0—8.0).

Редакция высылает автору статью для согласования только в виде корректуры. Все авторские исправления необходимо выделять цветом, курсивом, полужирным шрифтом и т.д. и не трогать формулы и специальные символы (греческие буквы, математические знаки и т.п.), в которых ошибки не допущены.

Поступление статьи в редакцию подтверждает полное согласие автора с правилами журнала.

Над номером работали

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы
О.О.АСТАХОВА
М.Б.БУРЗИН
Т.С.КЛЮВИТКИНА
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
О.И.ШУТОВА
А.О.ЯКИМЕНКО

Выпускающий редактор
Л.П.БЕЛЯНОВА

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод:
С.В.ЧУДОВ

Корректоры:
М.В.КУТКИНА
Л.М.ФЕДОРОВА

Графика, верстка:
А.В.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Российская академия наук,
президиум
Адрес издателя: 117997,
Москва, Профсоюзная, 90

Адрес редакции: 119049,
Москва, Мароновский пер., 26
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77
Факс: (499) 238-24-56

E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 22.12.2014
Формат 60×88 1/8
Офсетная печать
Заказ 881
Набрано и сверстано в редакции

Отпечатано в ППП типографии «Наука»
Академиздатцентра «Наука» РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6