

ПРИРОДА

10 18



В НОМЕРЕ:**3 А.Т.Базилевский, В.А.Дорофеева****Комета Чурюмова–Герасименко: исследования миссии «Розетта»**

Миссия «Розетта» к комете 67P Чурюмова–Герасименко завершилась два года назад, и многие из полученных ею результатов еще не до конца обработаны и осмыслены. Но некоторые итоги можно подвести уже сейчас.

18 А.Н.Взоров**Устойчивость ВИЧ и его взаимоотношения с иммунной системой**

Как известно, ВИЧ — один из самых устойчивых вирусов. Неэффективность адаптивного иммунного ответа организма связана с шипами на оболочке ВИЧ, которые образованы гликопротеином Env — трансмембранным белком с необычно длинным (150–200 а.е.) цитоплазматическим хвостом. Этот домен несет аминокислотные последовательности (мотивы), влияющие на функции Env-тримеров, в арсенале которых множество хитроумных механизмов ускользания от иммунной системы.

28 Н.М.Щеголькова, М.А.Козлова, А.В.Емельянов, К.Н.Шмони**Москва-река сегодня и завтра**

Важная характеристика благополучия реки — ее способность к биологическому самоочищению. И быстро избавиться от поступающих извне загрязняющих веществ может только целостная экосистема. Справляется ли Москва-река, принимающая в свои воды очищенные стоки столицы, с испытываемой ею антропогенной нагрузкой?

38 Е.М.Панова, А.В.Агафонов**Белуха — «морская канарейка»**

Полярные киты белухи — настоящий «акустический ребус» для исследователей вокального поведения этих животных, настолько разнообразна их звуковая сигнализация. Одно из перспективных направлений — изучение так называемых диалектов белух и географической изменчивости их сигналов.

46 А.А.Никонов**Сейсмическая угроза мегаполису Стамбулу: возможные варианты**

В 2016 г. в Турции был официально объявлен прогноз возникновения разрушительного землетрясения в районе Стамбула в течение ближайших 20–30 лет. Прогноз сделан по результатам изучения региональной геодинамики и анализу данных по скоростям горизонтальных смещений в сети GPS за последние 20 лет.

58 З.А.Зорина, А.А.Смирнова, Т.А.Обозова**Мышление птиц: понимают ли попугаи, о чем они говорят?**

Убедительный ответ на вопрос, вынесенный в заглавие статьи, имеет принципиальное значение, поскольку он напрямую связан с одной из важнейших задач современной когнитивной науки — исследованием эволюционных предпосылок мышления человека. И благодаря уникальной работе американского психолога Айрин Пеннерберг, проводимой ею на протяжении 40 лет, сегодня мы отвечаем утвердительно.

65 Д.Я.Фащук**Черное море: взлеты и падения отечественного рыболовства**
Окончание**80 Н.В.Лопатин****Дома и улицы древнего Изборска**

В результате археологических раскопок полностью изучена территория Труворова городища в Изборске, расположенного в 30 км к западу от Пскова. В культурном слое остались лишь фрагменты обугленных бревен и развалы печей, тем не менее на основе планов городских укреплений с въездными воротами и канавок от частоколов вдоль улиц удалось реконструировать систему кварталов города. Представить внешний вид жилых домов помогли аналогичные материалы лучшей сохранности, добытые археологами в других городах Руси.

Времена и люди**85 Е.Н.Груздева****Почетный член академии герцог Максимилиан Лейхтенбергский****93****Новые книги****95****Объявления**

CONTENTS:

- 3 A.T.Basilevsky, V.A.Dorofeeva**
**Churyumov–Gerasimenko Comet:
 Results of the Studies
 by «Rosetta» Mission**

The Rosetta mission to the comet 67P Churyumov–Gerasimenko finished two years ago, but many of the results obtained are not yet fully processed and understood. However, some results can be summarized now.

- 18 A.N.Vzorov**
**HIV Resistance and Its Relationship
 with the Immune System**

HIV is one of the most resistant viruses. The ineffectiveness of the adaptive immune response is associated with HIV envelope spikes, formed by Env glycoprotein, a transmembrane protein with an unusually long 150–200 a.a. cytoplasmic domain. This domain has several amino acid sequences (motifs) affecting the functions of the Env-trimers, which have a number of specific mechanisms for evading the immune system.

- 28 N.M.Shchegolkova, M.A.Kozlova,
 A.V.Emelyanov, K.N.Shmonin**
**The Moskva River
 Today and Tomorrow**

An important characteristic of the well-being of a river is its ability to biological self-purification. Only a balanced ecosystem can quickly get rid of contaminants coming from outside. Does the Moskva River, which receives the treated waste waters of the capital into its water-body, cope with the anthropogenic load?

- 38 E.M.Panova, A.V.Agafonov**
Beluga Whale – a Marine Warbler

The polar beluga whales are a real “acoustic rebus” for researchers of the vocal behavior of these animals, as their communicative signals are very diverse. One of the promising research directions is the study of the so-called dialects of the beluga whale and the geographical variability of their signals.

- 46 A.A.Nikonov**
**Seismic Hazard to Istanbul
 Metropolitan Area:
 Possible Opportunities**

In 2016 in Turkey the forecast of a destructive earthquake near Istanbul within the next 20–30 years was officially announced. This forecast was based on the results of studying of regional geodynamics and the analysis of data on speeds of lateral shifts in GPS network for the last 20 years.

- 58 Z.A.Zorina, A.A.Smirnova, T.A.Obozova**
**Birds’ Intelligence: Do Parrots
 Understand What They Are Saying?**

A convincing answer to the question posed in the title of this article is of fundamental importance, since it is directly related to one of the most important tasks of modern cognitive science – the study of the evolutionary factors of human intelligence. The unique long-term study of the American psychologist Irene Pepperberg gives rise to answer in the affirmative.

- 65 D.Ya.Fashchuk**
**The Black Sea: Ups-and-Downs
 in Domestic Fishery**
 The last part

- 80 N.V.Lopatin**
Houses and Streets of Ancient Izborsk

Archaeological excavations of the Truvor hillfort in Izborsk studied the entire territory of an old Russian border town. Only fragments of carbonized logs and collapses of stoves have survived in the cultural layer; nevertheless, the system of town quarters has been outlined on the basis of the plans of the town fortifications with gates and palisade trenches along the streets. Similar materials of better preservation obtained by archaeologists in other towns of Russia help to present the appearance of dwellings.

Times and People

- 85 E.N.Gruzdeva**
**Honorary Member
 of the Imperial Academy of Sciences
 Duke Maximilian of Leuchtenberg**

- 93** **New Books**

- 95** **Advertisements**

Комета Чурюмова—Герасименко: исследования миссией «Розетта»

А.Т.Базилевский¹, В.А.Дорофеева¹

¹Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского (Москва, Россия)

На снимках ядра кометы 67Р Чурюмова—Герасименко наблюдается консолидированный материал ядра и возникший в результате его выветривания мелкозернистый реголит. В пределах консолидированного материала видны трещины, образования типа пластов, бугорки различного размера, пикообразные «пиннаклы» и кратеро-видные депрессии. Поверхность реголита относительно гладкая, но в некоторых местах наблюдаются образования типа эоловых дюн. Комплексом приборов орбитального и спускаемого аппаратов на поверхности ядра и в коме определен минеральный состав ядра, идентифицирован ряд органических соединений и измерено отношение дейтерия к водороду, которое оказалось сильно отличающимся от значений в океанах Земли.

Ключевые слова: комета, ядро кометы, кома, консолидированный материал ядра, кометный реголит, текстура поверхности, линеаменты, кометные льды, изотопия водорода, азота.

Кометы — малые тела, которые приходят во внутреннюю часть Солнечной системы из далекого (30–55 а.е.) от Солнца и потому холодного Пояса Койпера и еще более далекого (50–100 тыс. а.е.) и более холодного Облака Оорта. Кометы богаты льдами различного состава, основную массу которых (до 80%) составляет лед воды. С приближением кометы к Солнцу льды начинают испаряться, их пары уходят в окружающее пространство, увлекая за собой частицы пыли. Вокруг прилетевшего из холодного далёка консолидированного тела (*ядра*) формируется сильно разреженная газопылевая оболочка (*кома*). Часть материала комы «сдувается» давлением солнечных лучей в сторону от Солнца, и возникает *хвост* кометы. Так образуются небесные тела, которые мы, обитатели внутренней части Солнечной системы, наблюдаем в телескопы (рис.1) и иногда даже невооруженным глазом.

Кометы интересны для нас как представители внешних частей нашей Солнечной системы, информация об их составе и строении важна для понимания общей картины формирования планетной системы в целом и отдельных ее частей. Об-



Александр Тихонович Базилевский, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН. Специалист в области геологии планетных и малых тел Солнечной системы. Лауреат Государственной премии СССР и премии Фонда Александра фон Гумбольдта (Германия). e-mail: atbas@geokhi.ru



Вера Алексеевна Дорофеева, доктор химических наук, профессор, заведующая лабораторией термодинамики и математического моделирования природных процессов того же института. Космохимик, область научных интересов — моделирование процессов образования и эволюции тел в ранней Солнечной системе.

суждается возможность того, что вода земных океанов, а также другие летучие компоненты, в частности азот, были, по крайней мере частично, привнесены на нашу планету кометами [1, 2]. Вместе с кометной пылью на Землю и другие тела Солнечной системы могли попасть сложные органические соединения — предшественники белковых моле-

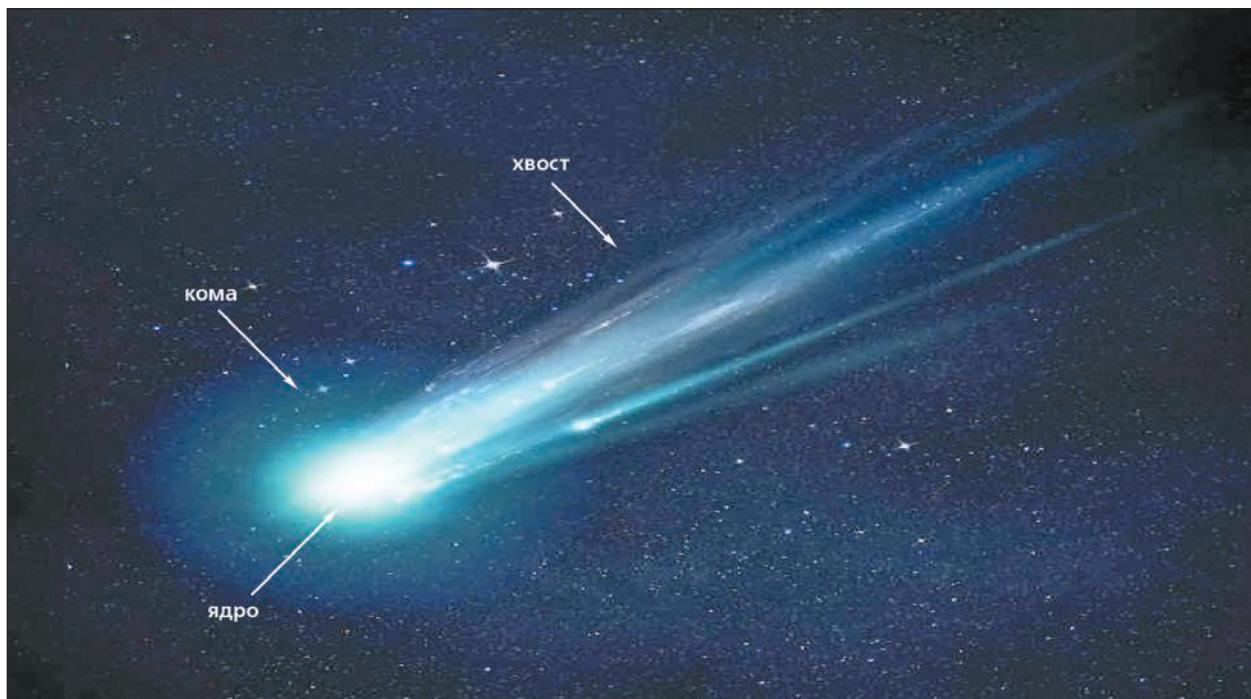


Рис. 1. Изображение кометы C/2012 S1 (ISON), полученное космическим телескопом «Хаббл».

opening.download/opening-download.html (НАСА, США)

кул, из которых затем могли развиваться различные формы жизни. На их поиски нацелены многие будущие космические миссии, в частности к крупным спутникам Юпитера и Сатурна — Европе, Ганимеду, Энцелладу и Титану, — на которых предполагается существование подповерхностных океанов.

Удары комет (и астероидов) по Земле могут представлять для нас хотя и эпизодическую, но довольно серьезную опасность. Тунгусская катастрофа 30 июня 1908 г., по-видимому, была взрывом в атмосфере Земли небольшой кометы [3, 4]. Мощности этого взрыва в тысячи раз больше мощности атомных бомб, взорванных над Хиросимой и Нагасаки. Если бы Тунгусская комета на пути к Земле задержалась примерно на 5 ч, многомегатонный взрыв в атмосфере случился бы не в безлюдном районе Сибири, а над Санкт-Петербургом. Для предотвращения таких ударов надо знать не только траектории, но и строение и состав приходящих из космоса «снарядов».

Почти вся масса кометы сосредоточена в ее ядре, и именно его изучение представляет для нас особый интерес. До космической миссии «Джотто» (Giotto) к комете Галлея (Halley) мы не видели изображений их ядер: мешало относительно яркое свечение комы и малый размер ядер. Миссия Giotto Европейского космического агентства (ЕКА) и несколько миссий НАСА (Deep Space 1, Stardust, Deep Impact, EPOXI) получили изображения ядер некоторых комет.

Ядра комет — тела неправильной формы размером от сотен метров до более чем 10 км. По-

верхность их черная (отражательная способность 0.03–0.05). По небольшому изменению траектории пролетающего мимо аппарата определялась масса кометы, а полученные изображения давали возможность оценить объем ядра. В результате рассчитывалась объемная плотность ядра, которая оказалась очень низкой (300–700 кг/м³), что указывает на высокую (>50–70%) пористость его материала [5, 6].

Проект «Розетта»

Полеты к кометам дали много важной информации. В частности, космическим аппаратам (КА) «Вега» при пролете сквозь кому кометы Галлея с помощью пылеударного масс-спектрометра удалось получить данные о составе отдельных частиц кометной пыли, а аппарат Stardust при пролете сквозь кому кометы Wild 2 захватил кометные частицы и доставил их на Землю. Но все эти миссии были пролетными и давали информацию о характеристиках кометы в течение короткого (часы) промежутка времени. Для длительных наблюдений за кометой ЕКА была осуществлена миссия «Розетта» с орбитальным и посадочным аппаратами* (рис.2) [7, 8].

Название миссии происходит от знаменитого Розеттского камня — каменной плиты с выбитыми на ней тремя идентичными по содержанию

* sci.esa.int/rosetta/

текстами, два из которых написаны на древнеегипетском языке (один — иероглифами, другой — демотическим письмом), а третий — на древнегреческом. Сравнивая тексты Розеттского камня, французский лингвист Ж.-Ф.Шампольон смог расшифровать древнеегипетские иероглифы.

На космическую миссию «Розетта» соответственно возлагались определенные надежды: собранные в ее ходе данные должны были помочь серьезно продвинуться в понимании ранней истории Солнечной системы. Космический аппарат «Розетта» стартовал с космодрома Куру, расположенного во Французской Гвиане на побережье Атлантического океана, 2 марта 2004 г. В качестве объекта исследований сначала предполагалась комета 46P/Wirtanen, но затем по техническим причинам запланировали полет к комете 67P Чурюмова—Герасименко (рис.3).

Эта комета была открыта в 1969 г. Климом Ивановичем Чурюмовым в Киеве на фотопластинках, снятых Светланой Ивановной Герасименко в Алма-Атинской обсерватории. Индекс 67P означает, что это 67-я открытая короткопериодическая (период обращения вокруг Солнца менее 200 лет) комета.

На сложной траектории движения к комете КА «Розетта» запланированно ускорял движение, пролетая один раз вблизи Марса, три раза вблизи Земли и мимо астероидов Штейнс и Лютеция, а в августе 2014 г. приблизился к комете 67P и стал сопровождать. На рис.3 показано ядро этой кометы размером 4.1×3.2×2.5 км, состоящее из трех частей, которые неофициально называют Телом, Головой и Шеей [9].

После детальной ТВ-съемки ядра было выбрано место посадки спускаемого аппарата «Филы» — на «верхушке» Головы ядра. И 14 ноября 2014 г. аппарат совершил посадку. После нескольких незапланированных подпрыгиваний длиной в сотни метров (отказали удерживающие гарпуны и прижимной ракетный двигатель) он «успокоился» в затененном месте, поэтому программа научных наблюдений выполнена им лишь частично. Орбитальный аппарат, то сближался с ядром до расстояния в несколько километров (когда газо-выделение было относительно слабым), то удалялся на сотни километров (когда поток газов усиливался, и захваченные им крупные пылинки могли повредить аппаратуру космического ко-



Рис.2. Орбитальный аппарат «Розетта» и спускаемый аппарат «Филы» над кратерообразной депрессией Хатмехит на Голове ядра кометы 67P (blogs.esa.int/rosetta/2014/10/31/rosetta-lined-up-for-lander-delivery, Artist impression. Credit: ESA–C. Carreau/ATG medialab). Изображение ядра получено 21.08.2014 камерой NavCam. Часть снимка ROS_CAM1_20140821T220718.

рабля). Миссия продолжалась до 30 сентября 2016 г., затем аппарат направили на сближение с ядром, и он запланированно столкнулся с ним в «верхушечной» части Головы.

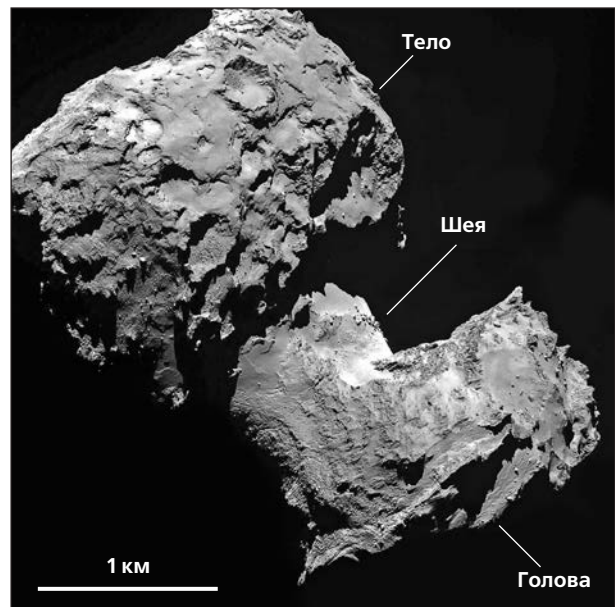


Рис.3. Изображение ядра кометы Чурюмова—Герасименко, полученное 06 августа 2014 г. ТВ-камерой OSIRIS.

Здесь и далее снимки ESA/ROSETTA/OSIRIS и NavCam
Снимок N20140806T041959143ID30F28

Материал ядра кометы

На снимках, полученных ТВ-камерами миссии «Розетта», различаются два типа вещества ядра: консолидированный материал, по-видимому, слагающий ядро на всю глубину, и перекрывающий его рыхлый реголит (рис.4).

На снимках консолидированный материал ядра выглядит трещиноватым, т.е. он обладает определенной связностью (прочностью), хотя и небольшой по земным меркам. По геометрии нависающих уступов и отсутствию видимых деформаций в основании крутых уступов оценена прочность этого материала на разрыв (от 1.5 до 100 Па), на сдвиг (от ~13 до ≥30 Па) и на сжатие (от 30 до 150 Па, возможно, до 1.5 кПа) [10, 11]. Это очень низкие значения. С учетом зависимости результатов измерений от размеров измеряемого объекта они близки к значениям для сухого свежевыпавшего снега при $t = -10^{\circ}\text{C}$. Однако в условиях очень низкой силы тяжести (10^{-4} земной) на поверхности ядра кометы блоки консолидированного материала, не разрушаясь, выдерживают падение с высоких уступов.

В команде «Розетты» рыхлый реголит называют *airfall deposits* — отложениями, осажденными из «воздуха». При сублимации льда, входящего в состав приповерхностного слоя ядра, этот материал, частица за частицей, увлекался образующимся газом и поднимался. Одна его часть, подхваченная потоком газа, мигрировала в открытый космос, а другая могла осесть на поверхности кометы, словно через «воздух». Но рыхлый материал поверхности образуется и при сублимационном вы-

ветривании обнажающегося на склонах консолидированного материала ядра. Рыхлый «остаток» ссыпается вниз и накапливается у склонов, например в основании уступа Хатор [12]. По глубине ямок от удара опорами аппарата «Филы» и измеренной динамике удара сделан вывод, что по крайней мере до глубины ~20 см реголит — зернистый (размер зерен ≤1 см) и сравнительно мягкий с максимальной прочностью на сжатие около 1–3 кПа [13]. С учетом влияния скорости удара прочность этого материала, по-видимому, составляет всего несколько сотен паскалей [11].

Текстуры поверхности консолидированного материала

На снимках поверхности консолидированного материала можно разглядеть два типа структур: линеаменты и бугорки.

На снимке крутого уступа Хатор (рис.5) на поверхности обнажающегося консолидированного материала различаются вертикальные линеаменты типа трещин и горизонтальные — типа пластовой отдельности [12, 14], а на участках, близких к горизонтальным, поверхность покрыта реголитом. Ниже склона видна существенно реголитовая поверхность Шеи. В основании уступа реголитовый материал «взбирается» на него, что свидетельствует о его ссыпании. Трещины в консолидированном материале наблюдаются практически во всех местах его обнажения (рис.6).

По длине трещин и среднему расстоянию между ними можно оценить глубину их проникнове-

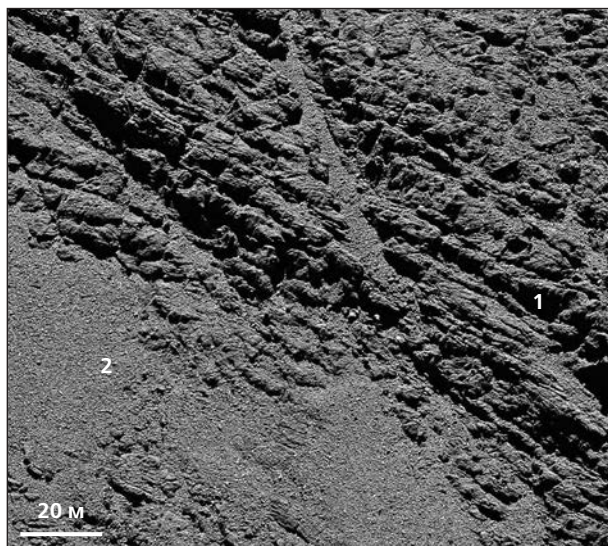


Рис.4. Консолидированный материал (1) и рыхлый кометный реголит (2) в юго-восточной части Головы ядра. Снимок получен 7 сентября 2016 г. камерой OSIRIS с разрешением 9 см на элемент изображения.

Часть снимка N20160917T191735352ID30F22

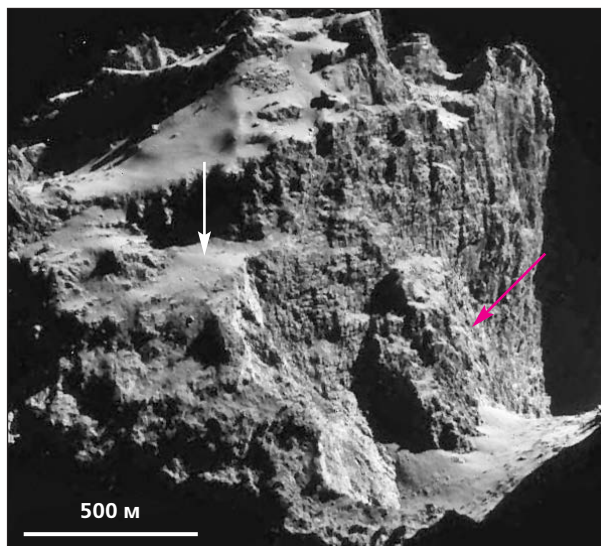


Рис.5. Самый высокий почти вертикальный уступ Хатор, на котором обнажается консолидированный материал. Красная стрелка указывает на тело предполагаемого оползня, белая — на участок, покрытый рыхлым реголитом.

Часть снимка N20141106T202256

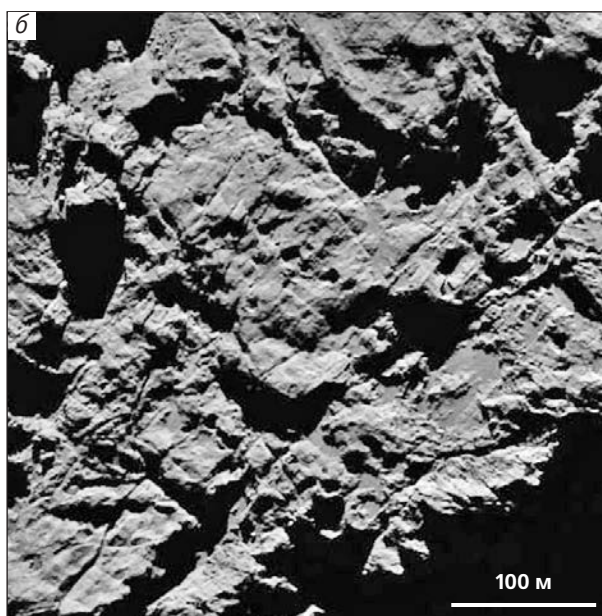
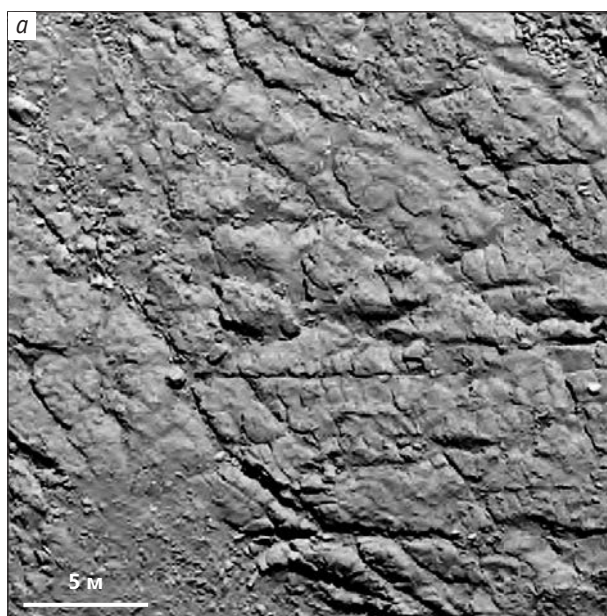


Рис.6. Трещины длиной около 1 м в консолидированном материале ядра на его Голове (а), и трещины длиной десятки и сотни метров — на его Теле (б).

Снимки W20160930T102837743ZIS201397549000F12, N20160207T082551483ID30F22

ния в ядро. В большинстве изученных случаев она не превышает нескольких метров, что соответствует глубине проникновения тепловой волны при сезонных (зима—лето) колебаниях температуры поверхности ядра [15]. По-видимому, это трещины растяжения, которые характеризуют только приповерхностный слой консолидированного материала.

На многих снимках различаются структуры, напоминающие слои в земных осадочных породах или пластовую отдельность — например, в гранитах.

На рис.7,а видны структуры типа пластов, «уходящих» вглубь ядра, а на рис.7,б — многочисленные террасы, которые могут быть поверхностным выражением примерно горизонтальных пластов.

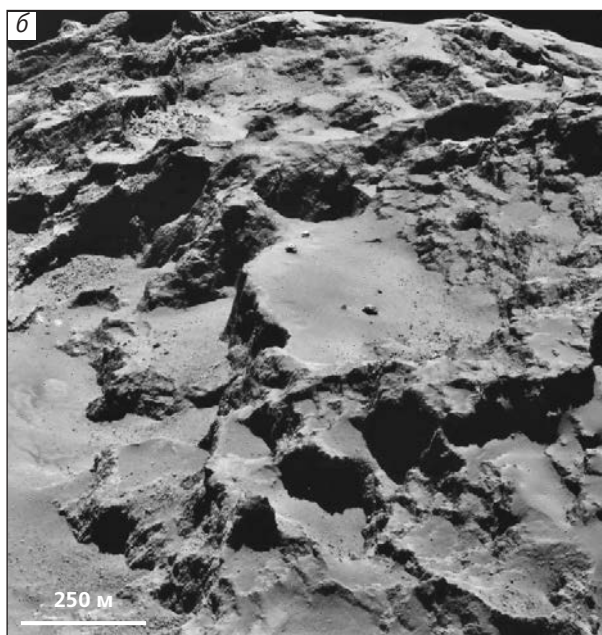
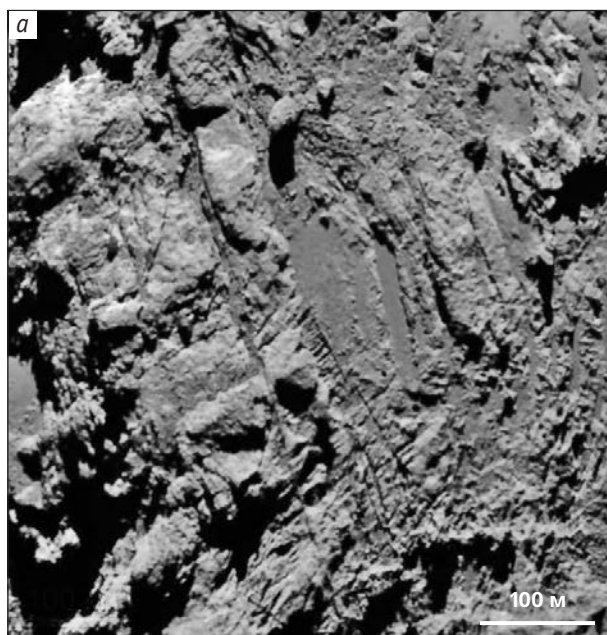


Рис.7. Структуры типа пластовой отдельности (а) и вид на склон Шеи, противоположный уступу Хатор (б).

Части снимков N20160130T131149715ID30F22, NavCam 2014–10–01T222256

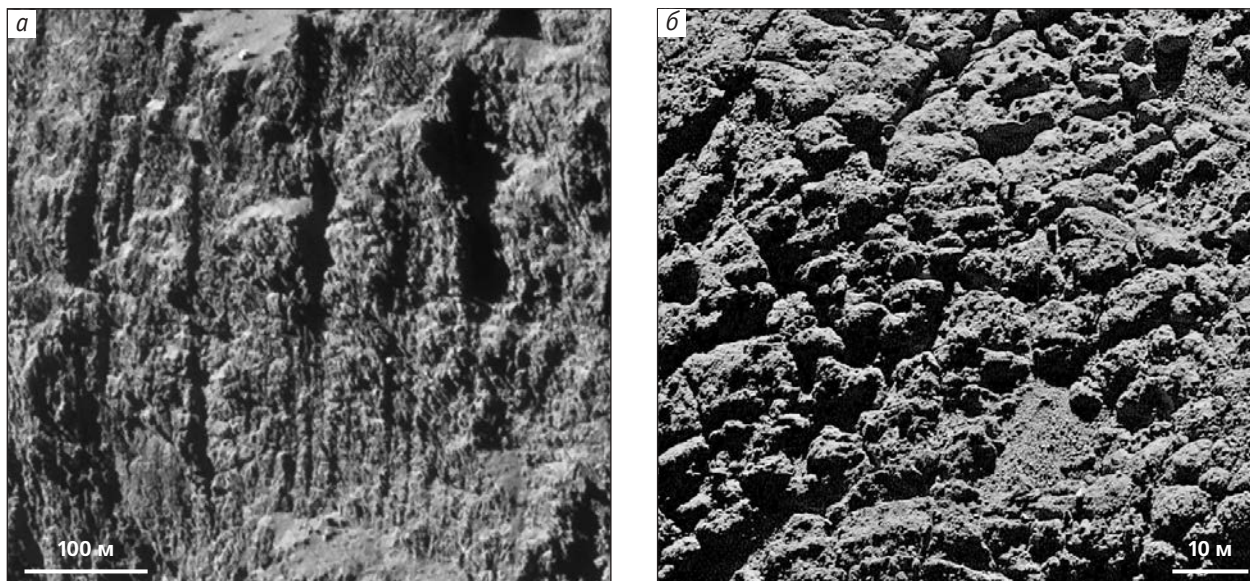


Рис.8. Бугристая текстура поверхности: в верхней части уступа Хатор, снимок повернут против часовой стрелки (а) и в южной части Головы (б).

Снимки ROS_CAM1_20160906T175932F, N20160519T110837677ID30F22

Проследив ориентировку таких террас по поверхности всего ядра, М.Массирони с соавторами обнаружили, что пласты «облекают» отдельно Тело и отдельно Голову [16]. Это позволило предположить, что данные две части ядра когда-то существовали независимо, затем встретились и при низкоскоростном столкновении слились. Следует сказать, что не все пластовые структуры ядра укладываются в облегающие образования, и внешне привлекательная гипотеза требует дальнейшей проработки.

Кроме линейментов на поверхности консолидированного материала ядра встречаются бугор-

ки (рис.8). На верхней части уступа Хатор хорошо видны вертикальные линейменты типа трещин, поверхность между ними имеет бугристую текстуру. Поперечники бугорков составляют несколько десятков метров.

Иногда на снимках отдельно лежащих блоков консолидированного материала, которые явно испытали сублимационное выветривание, различаются еще более мелкие бугорки — несколько десятков сантиметров. На рис.9 виден блок поперечником около 5 м. Диаметр бугорков на его поверхности составляет несколько десятков сантиметров. Очевидно, бугорчатость поверхности консолидированного материала отражает его «зернистое» строение в интервале размеров — от десятков метров до дециметров и меньше [6, 12]. По-видимому, это первичное свойство материала кометных ядер, отображающее специфику его образования.

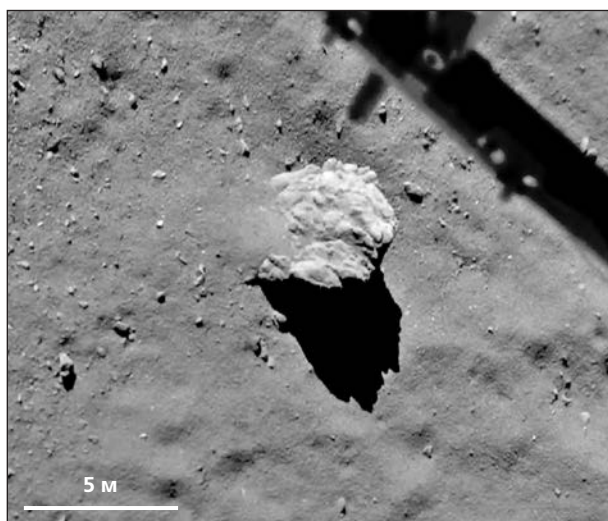


Рис.9. Блок консолидированного материала с бугорчатой поверхностью в районе Агилкия на Телe ядра.

Снимок камеры ROLIS, установленной на аппарате «Филы»

Пиннаклы

Во многих местах ядра кометы 67P видны пикообразные возвышенности — пиннаклы (рис.10). Кометные пиннаклы впервые были замечены на поверхности ядра кометы Wild 2 [17]. На снимках ядра кометы Чурюмова—Герасименко с более высоким разрешением пиннаклов гораздо больше и видны они лучше [18]. Считается, что кометные пиннаклы — это останцы более устойчивого к сублимационной эрозии вещества, которое находится в виде включений в материале ядра. Пиннаклы известны и на Земле, только эрозия здесь не сублимационная, а обыкновенная водная. Происхождение кометных пиннаклов предполагает, что их макси-

мальная высота соответствует минимальной толщине эродированного слоя. Для ядра кометы Чурюмова—Герасименко максимальная высота наблюдаемых пиннаклов составляет 100–200 м. Это может говорить о том, что ядро потеряло слой толщиной как минимум 100–200 м [18].

Кратерообразные формы рельефа

В ряде мест на поверхности ядра видны круглые в плане депрессии (см. рис.10). Внешне они похожи на частично разрушенные ударные кратеры. Их диаметры варьируют от 1 м до 1 км. Из некоторых выделяется газ с взвешенной мелкой пылью. Похожие структуры отмечены и на ядрах других комет. Скорее всего, это провальные депрессии, не имеющие отношения к ударным кратерам [19]. Единственный вероятный ударный кратер диаметром 35 м и глубиной 9 м (рис.11) обнаружен в области Аш [14].

Движение вещества вниз по склонам рельефа

На ядре кометы 67P довольно много крутых уступов, и в этих местах хорошо заметны следы движения вещества вниз по склонам рельефа.

На рис.12 видно, что по крайней мере часть блоков консолидированного материала размером около 1 м (и крупнее) при падении с уступов не разрушается. Очевидно, причина этого в очень низкой силе тяжести на поверхности ядра. Простой расчет показывает: свободное падение с высоты 200 м займет около 5 мин, а падающий блок наберет скорость всего около 30 см/с.

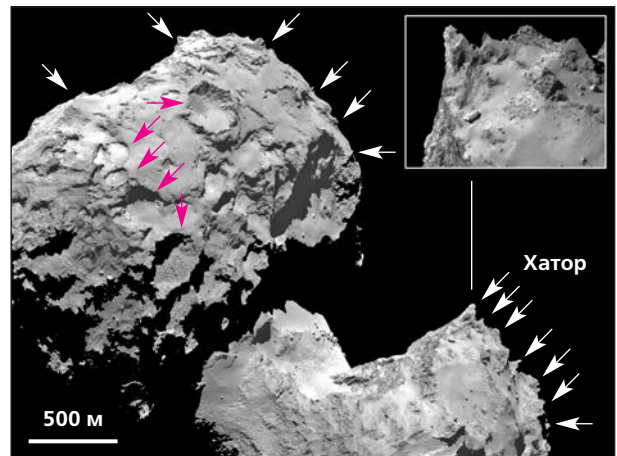


Рис.10. Пиннаклы (белые стрелки) на ядре кометы 67P. В врезке группа пиннаклов над уступом Хатор. Красные стрелки указывают на кратерообразные формы рельефа.

Снимок N20140806T041959143ID30F28

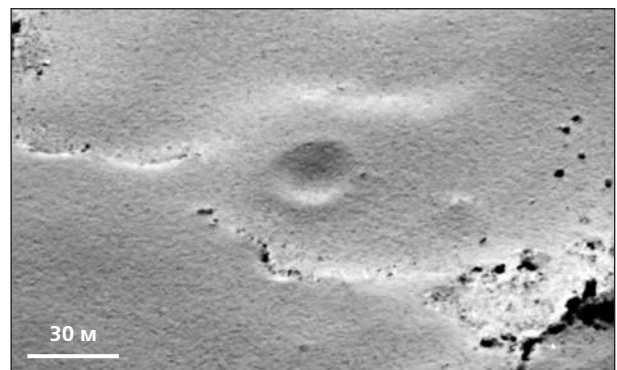


Рис.11. Вероятный ударный кратер на ядре кометы 67P.

Часть снимка N20140910T183412825ID30F16

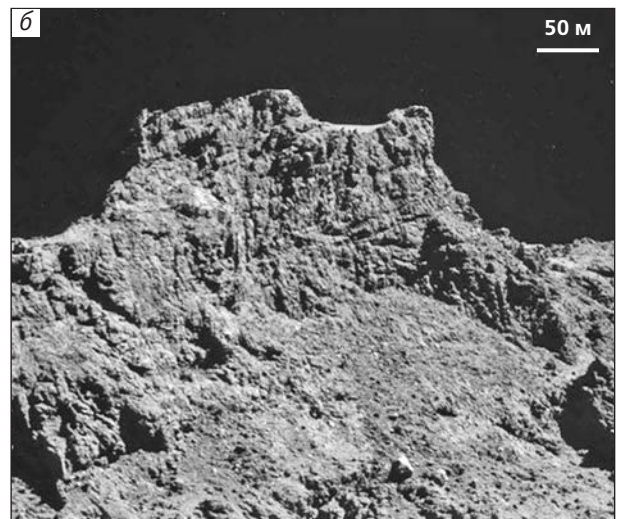
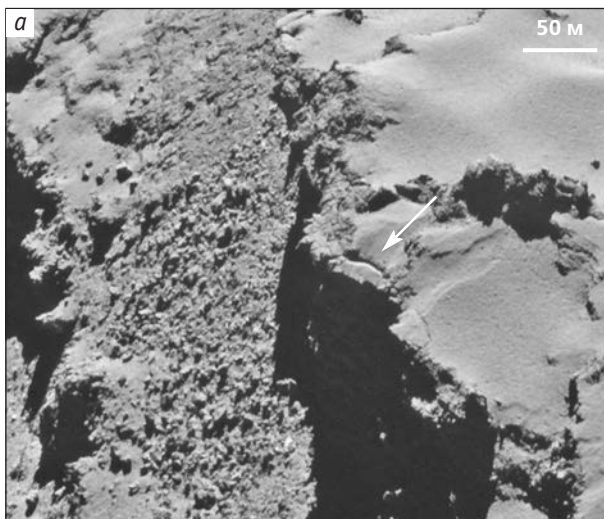
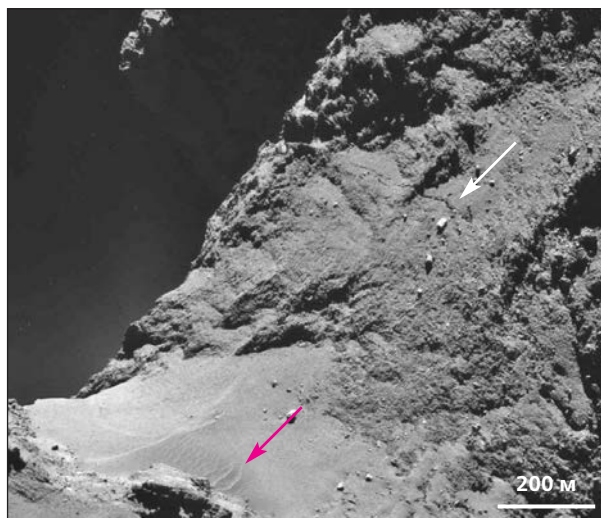


Рис.12. Крутой уступ с осыпью обвалившихся обломков. Стрелка указывает на зияющую трещину отрыва — предвестник нового обвала (а); высокий (~200 м) уступ с обнажающимся консолидированным материалом и осыпью обломков в основании (б).

Снимки N20141028T020855, NavCam ROS_CAM1_20141021T060855

Дюны

В нескольких местах на поверхности ядра наблюдаются образования типа эоловых дюн [14, 20] длиной десятки метров и шириной несколько метров (рис.13). Они очень похожи на эоловые дюны Земли и Марса. Однако механизм их образования не очень понятен. Для формирования эоловых дюн нужен ветровой поток. Как возможность такого можно было бы рассматривать поток газа из трещины растяжения, показанной на рис.13. Но дюнных полей на ядре 67P несколько, и только одно из них находится вблизи такой трещины. Необходимо какое-то более универсальное объяснение. Обсуждается возможность образования дюн под воздействием направленных потоков газа комы между освещенными и не освещенными в данный момент частями ядра [21].



Химия кометы 67P

Кометы относятся к наиболее примитивным объектам Солнечной системы. Согласно современным космогоническим и динамическим моделям [22], кометы, точнее, их ядра, образовались в транснептуновом регионе, на радиальных расстояниях от Солнца $r \sim 15-25$ а.е., в околосолнечном газопылевом протопланетном диске на самых ранних этапах его эволюции — в первые 1–3 млн лет. Впоследствии из-за гравитационного влияния входивших в резонанс планет-гигантов большая часть кометных ядер попала на Солнце, а остальные были выброшены на периферию Солнечной системы в регион Облака Оорта, либо вытеснены в регион Пояса Койпера (рис.14). Облако Оорта — источник долгопериодических комет, а Пояс Койпера и примыкающий к нему так называемый рассеянный диск — короткопериодических. В процессе эволюции Солнечной системы часть комет рассеянного

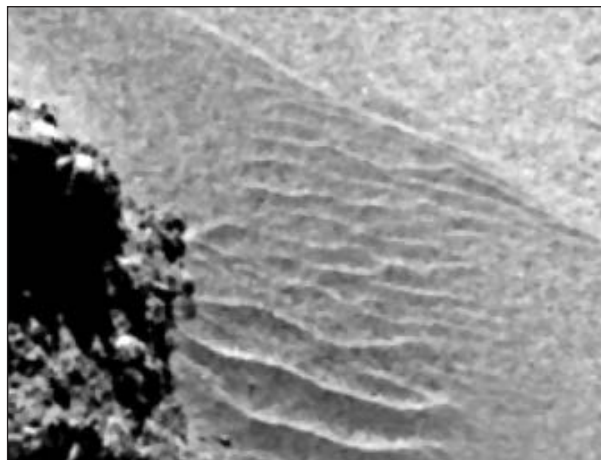


Рис.13. «Эоловые» дюны (красная стрелка) в районе Хапи на Шее ядра кометы 67P. Белая стрелка указывает на трещину разрыва. Внизу — увеличенное то же дюнное поле.

Снимки NavCam ROS_CAM1_20141018T102254, OSIRIS N20140917T235243330ZID101397549400F22

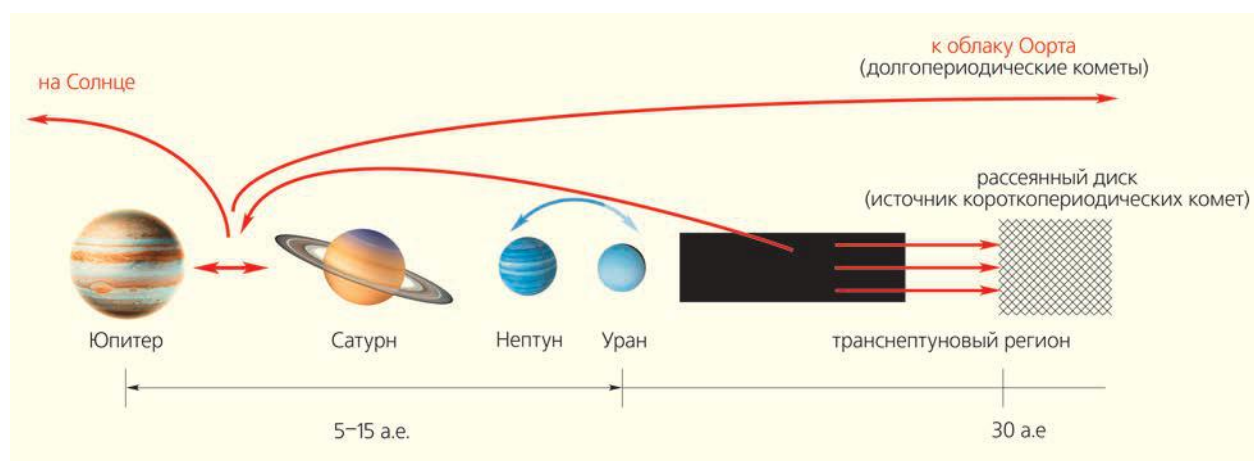


Рис.14. Схема эволюции орбит каменно-ледяных тел транснептунового региона в околосолнечном протопланетном диске на ранних этапах его эволюции.

диска благодаря гравитационному влиянию планет-гигантов могут менять свои орбиты и образуют семейства. Самое крупное из них — семейство Юпитера. Кометы движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, при этом точка перигелия (минимальное расстояние до Солнца) часто находится внутри орбит планет земной группы, что облегчает их изучение.

Большая часть жизни комет проходит на периферии Солнечной системы. К тому же, обладая высокой пористостью, их ядра имеют низкую теплопроводность. Из-за этого при приближении к Солнцу прогревается и изменяется состав только внешнего слоя толщиной всего несколько метров. Поэтому ядра комет в течение всей жизни сохраняют первичное каменно-ледяное вещество околосолнечного диска, из которого они образовались, в практически неизменном виде.

Особая значимость получаемой при исследовании комет информации заключается в том, что кометы — единственные объекты Солнечной системы транснептунового региона, которые на сегодняшний день доступны для непосредственного изучения.

Ядра комет состоят из каменной (минеральной) пыли, тугоплавких органических соединений (в сумме ~50–70 мас.%) и смеси льдов (~30–50 мас.%). Главный компонент кометного льда — лед H_2O (80–85%), остальные — льды CO_2 , CO , CH_4 , CH_3OH , NH_3 и др. О химическом составе ядер комет судят в основном по составу кометной комы — газопылевой оболочки диаметром несколько десятков тысяч километров, которая образуется вокруг ядра при испарении льдов, когда комета приближается к Солнцу на $r \leq 5$ а.е., т.е. при пересечении орбиты Юпитера. Благодаря переходу льдов в газообразное состояние появляется возможность спектроскопическими методами определить не только качественный, но и количественный состав комы. Сейчас в комах комет различных динамических типов экспериментально обнаружено более 20 так называемых материнских молекул и радикалов и большое количество вторичных (дочерних) молекул. В ряде из них были определены значения изотопных отношений, например D/H в молекулах H_2O и HCN , $^{14}N/^{15}N$ в CN , HCN и NH_2^+ .

При планировании исследований химического и изотопного состава кометы 67P с помощью аппаратуры, установленной на КА «Розетта» и посадочном модуле «Филы», преследовались главные образом три цели.

Во-первых, определить состав кометного ядра и, сравнив его с составом ядер других комет, получить представление о составе каменно-ледяных планетезималей, из которых вероятнее всего образовались все объекты внешней части Солнечной системы. Помимо этого, знание состава кометных ядер помогает оценить физико-химические и динамические условия как во внешней части газопыле-

вого околосолнечного диска на ранних стадиях его эволюции, так и в диске в целом. Во-вторых, найти аргументы в пользу или против гипотезы кометного происхождения воды и иных летучих на Земле и на других внутренних планетах. Эта гипотеза еще два десятилетия назад была преобладающей, да и сейчас у нее остается много сторонников. И наконец, главная задача миссии — найти свидетельства того, что именно благодаря кометам на Земле и на других телах Солнечной системы могла зародиться жизнь. Это одна из самых увлекательных проблем современной науки, и, возможно, именно вещество комет играет здесь ведущую роль.

Химический состав ядра кометы 67P как индикатор условий его образования

Рассмотрим составы тугоплавкой и ледяной составляющих ядра.

Тугоплавкая (пылевая) компонента. Как мы уже говорили, более или менее подробно проанализировать состав тугоплавкой компоненты оказалось возможным только для двух комет: *in situ* для кометы Halley и в лабораторных условиях на Земле — для кометы Wild 2. Основная задача при сборе кометной пыли — сохранить все ее компоненты. Из-за большой разницы скоростей кометы и приемника (установленного на пролетающем вблизи космическом аппарате) при ударе о мишень многие составляющие пыли разрушались. Информация, полученная в ходе космической миссии Rosetta, представляет особую ценность. Во-первых, изучение кометы 67P длилось более двух лет (как до, так и после прохождения перигелия) и космический аппарат в определенные периоды подходил на очень близкое (менее 10 км) расстояние к ядру. Во-вторых, и это главное, КА мог максимально (до $< 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) сблизать свою скорость со скоростью кометы, и значительное количество частиц, уловленных мишенью, во многом сохранили свой химический состав и физическую структуру. Всего удалось уловить более 35 тыс. пылевых частиц размером от 10 до 1000 мкм и проанализировать около 250 из них.

Исследования частиц проводились с помощью приборов: COSIMA (Cometary Secondary Ion Mass Analyzer) — масс-спектрометра вторичных ионов, предназначенного для определения элементного и изотопного состава пылинок, анализа неорганической и органической фаз в них, и картирующего спектрометра VIRTIS (Visible InfraRed Thermal Imaging Spectrometer) видимого и теплового ИК-диапазона, используемого для изучения свойств грунта. Полученные результаты показали, что тугоплавкая компонента ядра кометы 67P на ~55% по массе состоит из минеральной пыли и на 45% — из сложных органических соединений. Минеральная пыль представляет собой неравновесную смесь безводных силикатов, сульфида железа и аморфно-

го углерода [23–25]. Силикаты включают в себя железомagneзиевые оливины $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ и пироксены $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$. В целом такой состав отвечает составу межзвездной пыли, а соотношения основных породообразующих элементов (Fe, Mg, Si, Al, Na, K, Ca, а также Cr и Mn) близки к хондритовому, как и в ранее исследованных кометах Halley и Wild 2.

Помимо этого, в составе минеральной фракции кометы 67P найдено одно зерно, по составу подобное обогащенным Ca и Al тугоплавким включениям (CAI), которые входят в состав некоторых углистых хондритов [26]. Это наиболее древние объекты Солнечной системы, вероятнее всего образовавшиеся вблизи Солнца в результате высокотемпературной конденсации газовой фазы протопланетного диска и затем вынесенные в его внешнюю часть. Ранее такие включения были обнаружены в пылевой компоненте кометы Wild 2 [27]. Их присутствие свидетельствует о том, что в околосолнечном газопылевом диске существовал эффективный перенос вещества из внутренних горячих зон наружу (на десятки астрономических единиц), во внешние холодные регионы, где формировались кометные ядра.

Из двух сотен частиц, проанализированных инструментом COSIMA, в семи пылинках были обнаружены сложные органические вещества [28]. Они представляют собой смесь высокомолекулярных алифатических и ароматических углеводов, состоящих в основном из C, H, O, N. По составу этот материал аналогичен нерастворимому органическому остатку углистых хондритов, но содержит значительно большее количество водорода. Последнее может свидетельствовать о том, что, в отличие от астероидов, вероятно потерявших свой водород при нагревании, кометное вещество никогда не подвергалось сильному нагреву и сохранило водород. Таким образом, оно представляет собой наиболее примитивное вещество, сохранившее свой состав с момента возникновения Солнечной системы. Предполагается, что местом образования тугоплавкого органического вещества комет и метеоритов могли быть межзвездные молекулярные облака [29] или холодные внешние регионы протопланетного околосолнечного диска [30]. Возможно, часть присутствовавших в пыли алифатических углеводов могла термически разложиться при ударе о мишень, превратившись в аморфный углерод, который также установлен в собранной кометной пыли.

В целом можно сказать, что в тугоплавкой компоненте кометы 67P обнаружено высокое содержание углерода и азота, которые в основном входят в состав тугоплавких органических соединений. Атомное соотношение C/Si в пылевой компоненте кометы 67P в среднем составляет $5.5^{+1.4}_{-1.2}$ [25]. Это на порядок выше, чем в веществе примитивных углистых хондритов, но близко значению 4.4 ± 1.3 , полученному для пыли кометы Halley [31], и почти вдвое меньше протосолнеч-

ного значения $\text{C/Si}_{\text{Solar}} = 7.19 \pm 0.83$ [32]. Из этого следует важный вывод, что в газовой фазе протопланетного диска в виде легких углеводородов могла находиться всего лишь четверть всей массы углерода (или немного больше).

Относительное содержание азота в пылевой компоненте кометы 67P, как и в комете Halley, также высоко: $\text{N/C} = 0.035 \pm 0.011$ [33], что втрое выше, чем в углистых хондритах. А вот содержание кислорода в пылевой компоненте обеих комет ниже, чем в примитивных хондритах, $\text{O/Si}_{67\text{P}} = 5.5 \pm 0.5$. Это объясняется тем, что в состав кометного вещества входят только негидратированные минералы, в то время как в примитивных углистых хондритах типа CI силикаты гидратированы. Высокое содержание углерода и отсутствие гидратированных силикатов в кометной пыли однозначно свидетельствует о первичности вещества комет. Оно не прошло никакой постагреационной переработки, близко по составу межзвездному веществу и, таким образом, характеризует первичный состав пылевой компоненты в околосолнечном газопылевом протопланетном диске.

Ледяная компонента. Состав льдов определен для многих комет при спектроскопическом анализе их ком. Ледяная компонента ядра кометы 67P изучалась с помощью ИК-спектрометра высокого разрешения VIRTIS-H и масс-спектрометров DFMS и RTOF прибора ROSINA (Rosetta's Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis). Это спектрометр ионов и нейтральных атомов для определения элементного, изотопного и молекулярного состава комы. Установлено, что основные газы комы кометы 67P (как и ком большинства других комет) — H_2O , CO_2 и CO. В качестве компонентов-примесей в ней присутствуют CH_4 , C_2H_4 , CH_3OH , C_2H_6 и другие легкие углеводороды, а также соединения азота (HCN , NH_3 и N_2) и серы (H_2S , SO_2 , COS).

Кроме того, были идентифицированы инертные газы (Ar, Kr, Xe) и определен их изотопный состав. Результаты сравнения этих определений с данными для 30 других комет различных динамических типов представлены на рис.15. Поскольку вода — основной компонент кометных льдов и, соответственно, комы, содержания всех остальных ее составляющих определяются именно относительно содержания $\text{H}_2\text{O}_{\text{gas}}$. Число молей любого газа нормируется к 100 молям H_2O .

Из рис.15 видно, что относительные содержания, измеренные для всех компонентов комы 67P в южном полушарии (красные звездочки) кометы существенно выше, чем в северном (синие звездочки). Например, относительно содержание CO колеблется от 2.7 до 20%, а содержание CO_2 варьирует от 2.5 до 80%. Какие же данные правильнее (корректнее) отражают состав кометного ядра?

Дело в том, что кометы, как и все другие тела Солнечной системы, вращаются не только вокруг Солнца, но и вокруг собственной оси, которая у кометы 67P наклонена к плоскости эклиптики под уг-

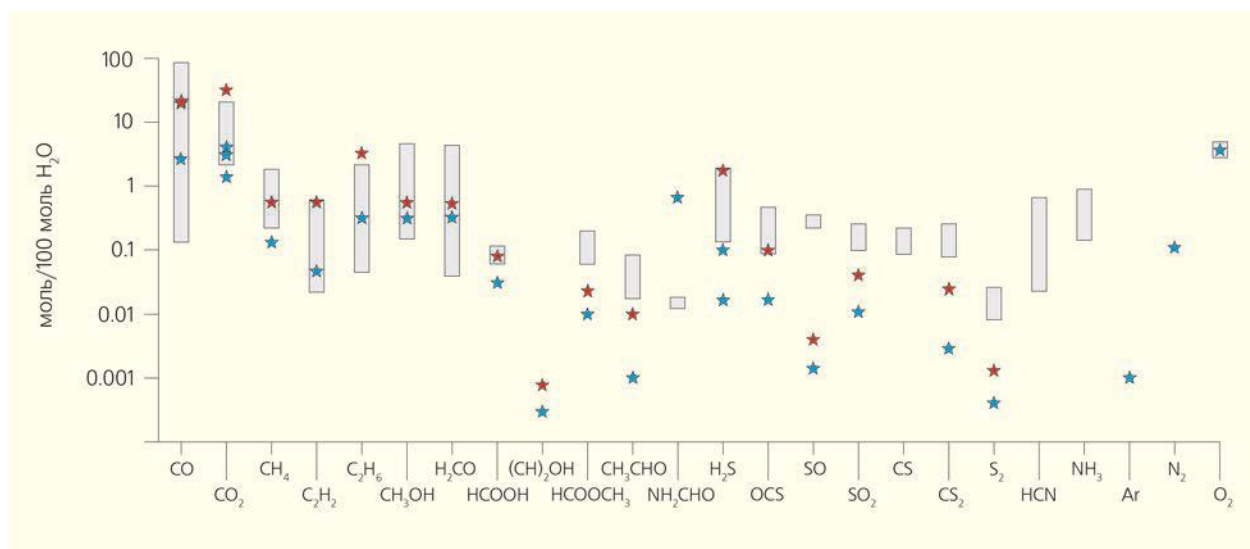


Рис.15. Относительные содержания компонентов комы кометы 67P в период ее нахождения на расстоянии $r \approx 3$ а.е. от Солнца. Затененными прямоугольниками показаны интервалы значений относительных содержаний компонентов ком 30 комет [34, 35]. Синия звездочка — северное полушарие, красная — южное.

лом 52° . На ее ядре, как и на Земле, происходит смена сезонов, но из-за того что орбита кометы не круговая, а эллиптическая, лето в северном полушарии длится 5.6 года, т.е. большую часть ее орбитального периода (≈ 6.4 года). Однако в это время комета находится далеко от Солнца, поэтому температура ее поверхности низка и сублимация газов из поверхностного слоя кометы незначительна, а главное, происходит практически без его разрушения. Данные термодинамических расчетов при общем давлении $\sim 10^{-6}$ – 10^{-8} бар дают следующие температуры сублимации (T_s) льдов: наиболее летучие льды CO , O_2 , Ar и N_2 имеют T_s в интервале 20–25 К, далее по мере приближения кометы к Солнцу и повышению температуры поверхности ее ядра сублимируют CH_4 ($T_s = 31$ К), C_2H_6 ($T_s = 44$ К), NH_3 ($T_s = 75$ К), CO_2 ($T_s = 80$ К), HCN ($T_s = 95$ К), CH_3OH ($T_s = 99$ К) и, наконец, при $T_s \approx 150$ К сублимирует лед воды.

В южном полушарии лето на комете 67P длится только 10 мес, но в это время она проходит перигелий, поверхность ядра максимально нагревается. Из-за этого темпы эрозии южного полушария значительно выше. Оно теряет часть поверхностного слоя, в результате обнажаются свежие, недегазированные слои ядра кометы. Относительные содержания всех летучих компонентов, сублимирующих из южного полушария, выше, чем из северного (даже когда комета находилась на расстоянии от Солнца ≈ 3 а.е., т.е. в северном полушарии было лето, а в южном — зима).

Отметим, что измерения содержаний всех высоколетучих компонентов (O_2 , Ar и N_2) могли происходить, только когда комета была значительно удалена от Солнца, газы выделялись незначительно и КА «Rosetta» находился на расстоянии ≥ 10 км

от ядра, не опасаясь разрушения приборов частицами пыли и камнями. Но поскольку в этот период освещалось только северное полушарие, более эродированное и подвергшееся за время жизни кометы сильной дегазации, полученные данные, видимо, следует считать заниженными относительно содержания высоколетучих компонентов в ядре кометы.

Обнаружение молекулярного азота (N_2) и кислорода (O_2), а также инертных газов (аргона, ксенона и криптона) в коме кометы свидетельствует об образовании 67P при очень низких температурах, близких к 20 К.

В постперигелийный период, когда комета находилась на расстоянии $r = 1.3$ а.е. от Солнца (перигелий отвечает $r = 1.24$ а.е.) в южном летнем полушарии измерялись относительные содержания лишь нескольких летучих компонентов: CO_2 , CH_4 и COS [35]. В среднем южное полушарие в летний период оказалось примерно в 10 раз более продуктивным по CO_2 и COS относительно воды и в 2–5 раз более продуктивным по CH_4 , чем северное полушарие летом. Однако различие концентраций этих компонентов в летний и зимний период для южного полушария невелико: содержания CO_2 и CH_4 практически совпадают, а содержание COS лишь в 1.5 раза выше.

Какие из приведенных наборов значений более адекватно отражают первичный состав ледяной компоненты ядра кометы 67P? Однозначного ответа на этот вопрос пока нет. Нужны дальнейшие исследования комет *in situ*, результаты которых позволят учитывать не только состав летучих в коме, но и разницу в летучестях ее компонентов, а также особенности состояния участков поверхности, на которых измеряется дегазация.

Изотопный состав воды кометы 67P и гипотезы кометного происхождения летучих на Земле

Важнейшее летучее соединение на нашей планете и по массе, и по значению — вода. Поступила ли она на Землю (так же, как и другие летучие вещества) с кометами, можно оценить по изотопному составу водорода в молекуле H_2O . В предшествующих экспериментах было измерено отношение дейтерия к водороду (D/H) в молекулах воды в комах 14 комет, из которых две короткопериодические принадлежат семейству Юпитера: 103P/Hartley 2 и 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková. У первой D/H_{H_2O} равно, а у второй близко изотопному составу океанской воды Земли ($1.56 \cdot 10^{-4}$) (рис.16). Остальные 12 долгопериодических комет имеют D/H_{H_2O} , превышающее D/H океанской воды Земли, как правило, в 2–3 раза. Напротив, D/H_{H_2O} примитивных метеоритов, родительские тела которых образовались в поясе астероидов, отвечает изотопному составу воды Земли.

До эксперимента «Розетта» высказывались предположения, что источником воды и других летучих компонентов на Земле могли быть короткопериодические кометы, подобные 103P и 45P. Однако полученные «Розеттой» результаты этого предположения не подтвердили. Оказалось, что у короткопериодической кометы 67P значение $D/H_{H_2O} = (5.3 \pm 0.7) \cdot 10^{-4}$ [36], т.е. оно более чем в три раза выше земной величины и значений для двух других комет семейства Юпитера. Таким образом, несмотря на то что астероиды содержат меньше воды, воздействие их большого количества на Землю могло привести к появлению океанов на нашей планете.

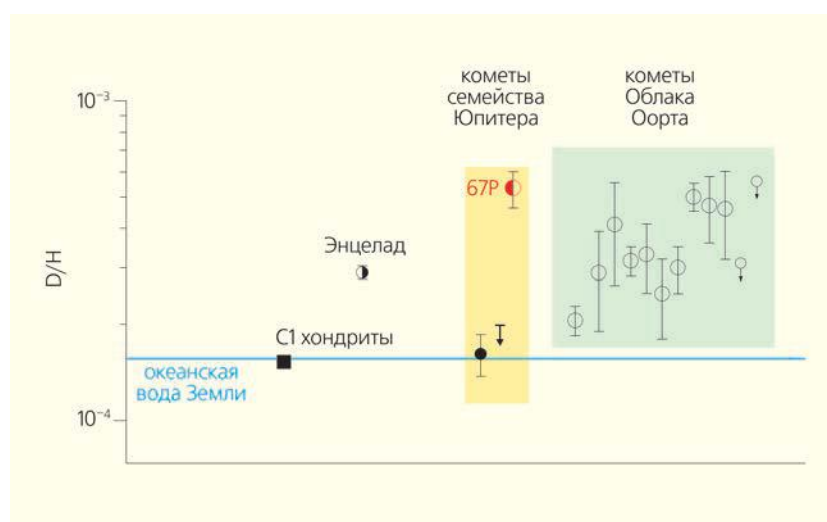


Рис.16. Изотопный состав водорода в воде (D/H_{H_2O} , нормированный по эталону VSMOW), в углистых хондритах (C1), в водных плюмах спутника Сатурна — Энцелада, в трех короткопериодических кометах семейства Юпитера и 12 долгопериодических кометах Облака Оорта.

Роль комет в возникновении биологической жизни на Земле

Как уже упоминалось, одна из целей космического эксперимента «Розетта» заключалась в оценке возможной роли вещества комет в происхождении жизни на Земле, в частности в ответе на вопрос, могли ли кометы принести на нашу планету жизненно важные биологические соединения или вещества-предшественники для их образования. Эту идею впервые высказал Дж.Оро (John Oro) в 1960 г. [37]. Ответ должен был дать спускаемый зонд «Филы», оборудованный инструментами для анализа химического состава газа (Ptolemy) и пыли (COSAC), отобранных непосредственно с поверхности кометного ядра. COSAC проанализировал вещество, попавшее в его приемник в момент первого контакта с поверхностью кометы [38]. Материал оказался беден льдом, но богат органическими соединениями. Были идентифицированы 16 различных органических соединений, в том числе метилизоцианат (CH_3NCO), ацетон (CH_3COCH_3), пропионовый альдегид (C_2H_5CHO) и ацетамид (CH_3CONH_2) — вещества, которые ранее в кометной пыли не обнаруживали.

Одновременно Ptolemy проанализировал состав эфемерной атмосферы вокруг посадочного аппарата и зафиксировал основные ее компоненты — водяной пар, угарный и углекислый газы. В качестве примесей было обнаружено еще несколько летучих органических соединений, в том числе формальдегид [39]. Некоторые из этих соединений (в особенности те, которые содержат углерод-азотные связи) играют ключевую роль в синтезе аминокислот, сахаров и нуклеинов. На-

пример, формальдегид, зафиксированный в коме 67P, участвует в формировании рибозы, производная которой глицин (компонент ДНК) обычно встречается в белках. Все это говорит о том, что с учетом присутствия большого количества воды и углекислого газа кометное вещество содержит необходимые строительные блоки для синтеза аминокислот, сахаров и нуклеинов — необходимых компонентов для зарождения жизни.

* * *

Миссия «Розетта» завершилась два года назад, и многие из полученных ею результатов еще не до конца обработаны и осмыслены. Но некоторые итоги можно подвести уже сейчас.

Геолого-морфологический анализ изображений ядра коме-

ты 67P показал, что, несмотря на необычный характер его вещества (высокопористый малопрочный материал, состоящий из смеси минералов, органических соединений и различных льдов) и весьма специфическую обстановку (очень низкая сила тяжести и периодически возникающая сильно разреженная атмосфера), на поверхности ядра действует ряд знакомых нам процессов. Конечно, главный процесс (во многом определяющий течение других) — сублимация ледяной составляющей материала ядра. При сублимации неледяные частицы материала ядра мобилизуются и в большинстве случаев покидают его, образуя пылевую составляющую комы, а с течением времени рассеиваются в межпланетном пространстве. Небольшая часть мобилизованного материала остается на ядре, образуя кометный реголит. По высотам вышеописанных пиннаклов удалось оценить, что ядро кометы 67P в ходе сублимационной эрозии потеряло слой толщиной как минимум 100–200 м.

Консолидированный материал ядра с поверхности деформирован трещинами, часть из них, вероятно, возникла в результате сезонных колебаний температуры поверхности. Бугристая текстура разного масштаба на поверхности, по-видимому, отражает первичные неоднородности в материале ядра. Наблюдаются образования, напоминающие слоистость в осадках или слоенность в некоторых магматических породах. Природа их пока непонятна. Совершенно неожиданно на поверхности ядра обнаружили небольшие дюны, очень похожие на эоловые дюны планет с атмосферами. Были отмечены и кратерообразные депрессии, скорее всего, неудачного происхождения. Возможно, это результат проявления неоднородностей в материале ядра при его сублимационной мобилизации. На крутых склонах поверхности ядра видны следы обвалов и оползней.

Химический и фазовый состав вещества кометы 67P определялся приборами орбитального и посадочного аппаратов. Удалось проанализировать около 250 пылевых частиц, захваченных из комы, и определить их фазовый состав. Результаты анализа подтверждают первичный, не измененный со времени аккреции, состав вещества этой кометы. «Розетта» проводила изучение кометы Чурюмова—Герасименко в течение двух лет, до прохождения ею перигелия и после него, что позволило понять, какие измерения состава газов комы лучше характеризуют состав летучих компонентов ядра. Оказалось, те, что выполнены после прохождения перигелия, когда интенсивный нагрев поверхности привел к значительной эрозии и обнажению свежего, недегазированного материала ядра.

В водяном паре комы было измерено отношение дейтерия к водороду и установлено, что оно заметно отличается от значений в земных океанах. Это противоречит популярным ранее предположениям, что источником воды и других летучих компонентов на Земле могли быть короткопериодические кометы. Измерения, выполненные спускаемым аппаратом «Филы» (рис.17), определили в составе материала поверхности ядра 16 органических соединений, причем некоторые из них ранее в составе кометного вещества не находили.

Накопление знаний о составе органических соединений, возможных предшественников и строительных блоков живого вещества Земли приближа-



Рис.17. А.Т.Базилевский с внуком Гошей сидят на макете ядра кометы Чурюмова—Герасименко. На заднем плане — спускаемый аппарат «Филы», который при посадке завалился на бок. Фойе Института Макса Планка по исследованию Солнечной системы (Max Planck Institute for Solar System Research. г.Геттинген, Германия).

ет нас к пониманию происхождения жизни на нашей планете. Очевидно, что это необходимо, но также очевидно, что только этих знаний недоста-

точно. Нужна теория, предлагающая механизм перехода от неживых строительных блоков к живому саморазвивающемуся веществу. ■

Работа поддержана Программой I.28 Президиума РАН (тема 0137-2018-0038). Авторы признательны Европейскому космическому агентству и команде «Розетты» за предоставление снимков ядра кометы 67P.

Литература / References

1. Owen T., Bar-Nun A. From the interstellar medium to planetary atmospheres via comets. *Faraday Discussions*. 1998; (109): 453–462.
2. Marty B., Yokochi R. Water in the Early Earth. *Water in Nominally anhydrous Minerals. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2006; 62: 421–450.
3. Фесенков В.Г. О природе Тунгусского метеорита. *Метеоритика*. 1961; XX: 27–31. [Fesenkov V.G. On the nature of Tunguska meteorite. *Meteoritics*. 1961; XX: 27–31. (In Russ.)]
4. Флоренский К.П. Проблема космической пыли и современное состояние изучения Тунгусского метеорита. *Геохимия*. 1963; (3): 284–296. [Florensky C.P. Problem of cosmic dust and the modern status of study of Tunguska meteorite. *Geokhimiya*. 1963; (3): 284–296. (In Russ.)]
5. Базилевский А.Т., Келлер Х.У. Кратеры, участки гладкой поверхности, потоки и слоистость на ядрах комет. *Астрономический вестник*. 2007; 41(2): 1–10. [Basilevsky A.T., Keller H.U. Craters, smooth terrains, flows, and layering on the comet nuclei. *Solar System Research*. 2007; 41(2): 109–117.]
6. Davidsson B.J.R., Sierks H., Güttler C. et al. The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Astronomy & Astrophysics*. 2016; 592: A63.
7. Taylor G.G.T., Altobelli N., Buratti B.J., Choukroun M. The Rosetta mission orbiter science overview: The comet phase. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2017; A375: 20160262.
8. Boehnhardt H., Bibring J.-P., Apathy I. et al. The Philae lander mission and science overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2017; A375: 20160248.
9. Sierks H., Barbieri C., Lamy P.L. et al. On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Science*. 2015; 347(6220): aaa1044–1–5.
10. Groussin O., Jorda L., Auger A.-T. et al. Gravitational slopes, geomorphology and material strengths of the nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko from OSIRIS observations. *Astronomy & Astrophysics*. 2015; 583: A32.
11. Базилевский А.Т., Красильников С.С., Ширяев А.А. и др. Оценка прочности материала ядра кометы 67P Чурюмова–Герасименко. *Астрономический вестник*. 2016; 50(4): 241–251. [Basilevsky A.T., Krasil'nikov S.S., Shiryayev A.A. et al. Estimating the strength of the nucleus material of comet 67P Churyumov–Gerasimenko. *Solar System Research*. 2016; 50(4): 225–234.]
12. Basilevsky A.T., Mall U., Keller H.U. et al. Geologic analysis of the Rosetta NavCam, Osiris and ROLIS images of the comet 67P/Churyumov–Gerasimenko nucleus. *Planetary and Space Science*. 2017; 137: 1–19.
13. Biele J., Ulamec S., Maibaum M. et al. The landing(s) of Philae and inferences about comet surface mechanical properties. *Science*. 2015; 349(6247): aaa9816–1.
14. Thomas N., Sierks H., Barbieri C. et al. The morphological diversity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Science*. 2015; 347(6220): aaa0440–1–6.
15. Базилевский А.Т., Скоров Ю.В., Хвид Ш.Ф. и др. Линеаменты, наблюдаемые на поверхности консолидированного материала ядра кометы 67P Чурюмова–Герасименко. *Астрономический вестник*. 2018. (В печати). [Basilevsky A.T., Skorov Yu.V., Hviid S.F. et al. Lineaments observed on the surface of the consolidated material of nucleus of comet 67P Churyumov–Gerasimenko. *Solar System Research*. 2018. (In press).]
16. Massironi M., Simioni E., Marzari F. et al. Two independent and primitive envelopes of the bilobate nucleus of comet 67P. *Nature*. 2015; 526: 402–405.
17. Brownlee D.E., Horz F., Newburn R.L. et al. Surface of young Jupiter family comet 81 P/Wild 2: view from the Stardust spacecraft. *Science*. 2004; 304(5678): 1764–1769.
18. Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Mall U. et al. Pinnacles on the 67P comet nucleus: Evidence for large scale erosion and hierarchical agglomeration of the nucleus. *Planetary and Space Science*. 2017; 140: 80–85.
19. Ip W.-H., Lai L.-L., Lee J.-C. et al. Physical properties and dynamical relation of the circular depressions on comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Astronomy & Astrophysics*. 2016; 591: A132.
20. Thomas N., Davidsson B., El-Maarry M.R. et al. Redistribution of particles across the nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Astronomy & Astrophysics*. 2016; 583: A17.
21. Jia P., Andreotti B., Claudin P. Giant ripples on comet 67P/Churyumov–Gerasimenko sculpted by sunset thermal wind. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 2017; 114(10): 2509–2514.

22. *Emel'yanenko V.V., Asber D.J., Bailey M.E.* A Model for the Common Origin of Jupiter Family and Halley Type Comets. *Earth, Moon, and Planets.* 2013; 110(1–2): 105–130.
23. *Rotundi A., Sierks H., Della Corte V. et al.* Dust measurements in the coma of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko in bound to the Sun. *Science.* 2015; 347(6220): aaa3905.
24. *Wooden D.H., Isbii H.A., Zolensky M.E.* Cometary dust: the diversity of primitive refractory grains. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2017; 375(2097): 20160260.
25. *Bardyn A., Baklouti D., Cottin H. et al.* Carbon-rich dust in comet 67P/Churyumov–Gerasimenko measured by COSIMA/Rosetta. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2017; 469(2): S712–S722.
26. *Paquette J.A., Engrand C., Stenzel O., Hilchenbach M., Kissel J.* Searching for calciumaluminum-rich inclusions in cometary particles with Rosetta/COSIMA. *Meteorit. Planet. Sci.* 2016; 51(7): 1340–1352.
27. *Simon S.B., Joswiak D.J., Isbii H.A. et al.* A refractory inclusion returned by Stardust from comet 81P/Wild 2. *Meteoritics & Planetary Science.* 2008; 43(11): 1861–1877.
28. *Fray N., Bardyn A., Cottin H. et al.* High-molecular-weight organic matter in the particles of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Nature.* 2016; 538: 72–74.
29. *Bockelée-Morvan D., Lis D.C., Wink J.E. et al.* New molecules found in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). Investigating the link between cometary and interstellar material. *Astron. Astrophys.* 2000; 353: 1101–1114.
30. *Ciesla F.J., Sandford S.A.* Organic synthesis via irradiation and warming of ice grains in the solar nebula. *Science.* 2012; 336: 452–454.
31. *Jessberger E.K., Christoforidis A., Kissel J.* Aspects of the major element composition of Halley's dust. *Nature.* 1988; 332: 691.
32. *Lodders K.* Solar system abundances of the elements. *Principles and Perspectives in Cosmochemistry.* A.Goswami, B.E.Reddy (eds). *Astrophysics and Space Science Proceedings.* Berlin; Heidelberg, 2010; 379–417.
33. *Fray N., Bardyn A., Cottin H. et al.* Nitrogen-to-carbon atomic ratio measured by COSIMA in the particles of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2017; 469: S506.
34. *Le Roy L., Altwegg K., Balsiger H. et al.* Inventory of the volatiles on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/ROSINA. *Astron. Astrophys.* 2015; 583(A1).
35. *Bockelée-Morvan D., Crovisier J., Erard S. et al.* Evolution of CO₂, CH₄, and OCS abundances relative to H₂O in the coma of comet 67P around perihelion from Rosetta/VIRTIS-H observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2016; 462(1): S170–S183.
36. *Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A. et al.* 67P/Churyumov–Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science.* 2015; 347(6220): 1261952–1. Doi:10.1126/science.1261952.
37. *Oró J.* Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth. *Nature.* 1961; 190: 389–390.
38. *Goesmann F., Rosenbauer H., Bredehöft J.H. et al.* Organic compounds on comet 67P/Churyumov–Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry. *Science.* 2015; 349(6247): aab0689–1.
39. *Wright I.P., Sheridan S., Barber S.J. et al.* CHO-bearing organic compounds at the surface of 67P/Churyumov–Gerasimenko revealed by Ptolemy. *Science.* 2015; 349(6247): aab0673–1.

Churyumov–Gerasimenko Comet: Results of the Studies by “Rosetta” Mission

A.T.Basilevsky¹, V.A.Dorofeeva¹

¹*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS (Moscow, Russia)*

In the images of nucleus of comet 67P Churyumov–Gerasimenko consolidated material and fine-grained regolith formed due to its weathering are observed. Within the consolidated material the fractures, layer-like forms, knobs of different sizes, pinnacles and crater-like depressions are seen. Surface of the regolith is relatively smooth, but in some places features looking as eolian dunes are seen. By a set of instruments of orbital spacecraft and lander on the nucleus surface and in coma the mineral composition of the nucleus material was determined, a number of organic compounds were identified and deuterium/hydrogen ratio was measured. The latter one turned to be very different from that of terrestrial oceans.

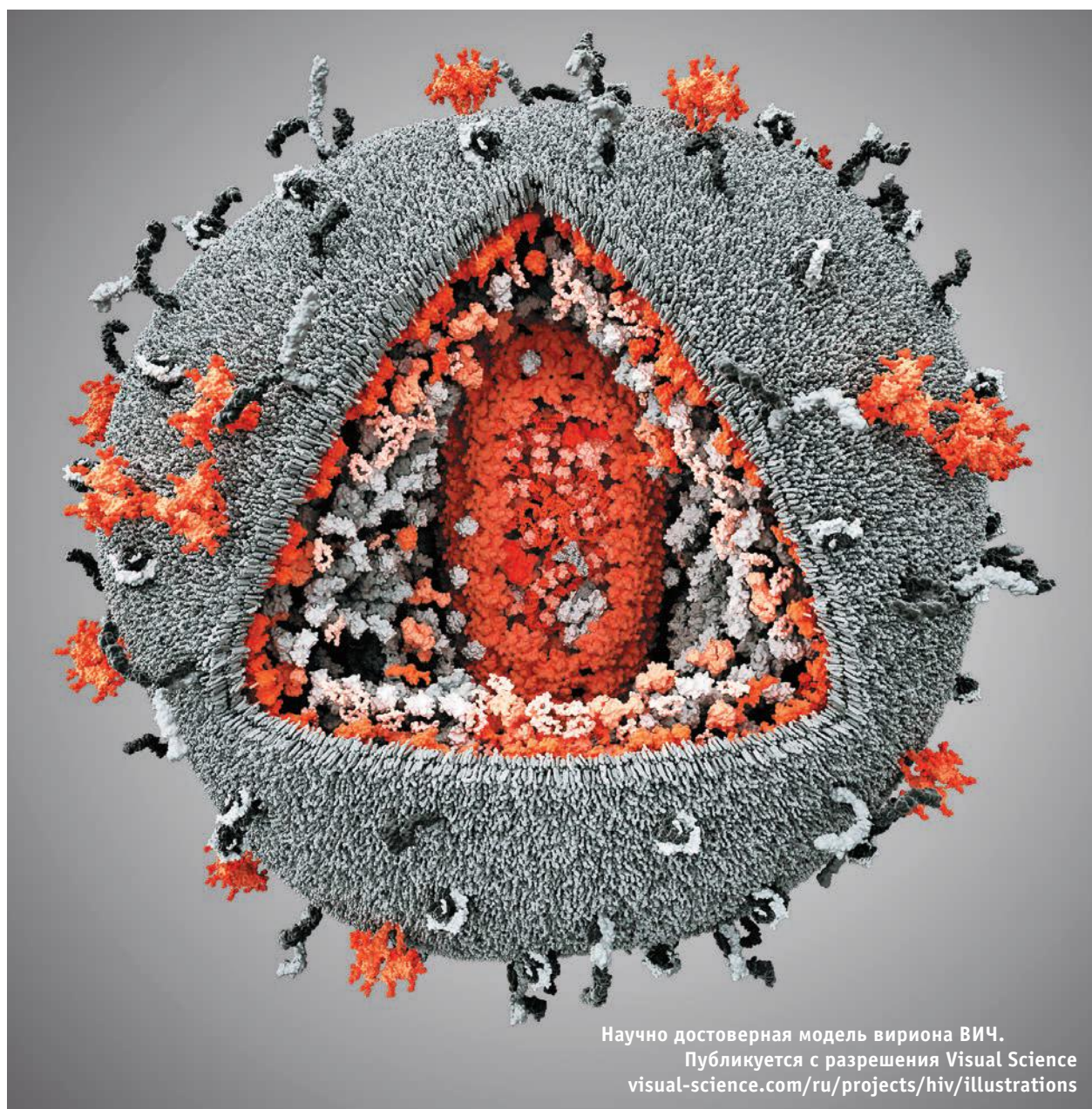
Keywords: comet, comet nucleus, consolidated nucleus material, cometary regolith, surface texture, lineaments, cometary ices, isotope composition of hydrogen and nitrogen.

Устойчивость ВИЧ и его взаимоотношения с иммунной системой

А.Н.Взоров^{1,2}

¹Институт вирусологии имени Д.И.Ивановского, Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени Н.Ф.Гамалеи Минздрава России (Москва, Россия)

²Биологический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)



Научно достоверная модель вириона ВИЧ.
Публикуется с разрешения Visual Science
visual-science.com/ru/projects/hiv/illustrations

Как известно, ВИЧ — один из самых устойчивых вирусов, способный ускользнуть от иммунной системы организма. Неэффективность адаптивного иммунного ответа связана с шипами оболочки ВИЧ, которые образованы гликопротеином Env. Его цитоплазматический домен несет аминокислотные последовательности (мотивы), влияющие на функции Env-тримеров, в арсенале которых множество механизмов ускользания от иммунной системы. К ним относятся: низкое содержание Env-тримеров в оболочке ВИЧ; включение в оболочку ВИЧ нефункциональных форм Env-тримеров, вызывающих нецелевой иммунный ответ; антигенная вариабельность Env-тримеров в течение курса инфекции, во время мембранного слияния с клеткой-мишенью; создание препятствий для узнавания нейтрализующими антителами консервативных эпитопов; конформационная динамика Env-тримеров; закрытие белковых эпитопов гликанами.

Ключевые слова: ВИЧ, гликопротеин, иммунный ответ, Env-тримеры, цитоплазматический домен, механизмы вирусного ускользания.

Не лишним будет напомнить, что вирус иммунодефицита человека (ВИЧ, или HIV, от англ. human immunodeficiency virus) относится к роду лентивирусов (*Lentivirus*) семейства ретровирусов (*Retroviridae*). Несмотря на кодирование только 15 зрелых белков, ВИЧ-1 (самый распространенный тип ВИЧ) может вызывать персистентную форму инфекции у людей, при этом избегая врожденных и адаптивных иммунных ответов. Наиболее важная характеристика иммунобиологии ВИЧ и SIV (от англ. simian immunode-

ficiency virus — вирус иммунодефицита обезьян) — скорость и динамичность этих вирусов. Несмотря на то что их групповое название рода происходит от латинского слова *lente* (медленный) и дано на основе медленного клинического проявления инфекции, лентивирусы способны быстро создать большую генетически гибкую адаптивную вирусную популяцию до появления эффективного противовирусного иммунитета и, как следствие, могут быстро образовывать вирусные варианты в ответ на селективное давление окружающей среды. Эта стратегия почти всегда дает вирусу возможность быть на шаг впереди эффективного иммунного ответа.

Сферической формы частица ВИЧ диаметром 100–180 нм окружена клеточной двуслойной мембраной, под которой находится матриксный белок и конической формы белковый капсид, содержащий две молекулы РНК и ферменты, обеспечивающие размножение вируса в клетке.

Внутри вириона и на поверхности его мембраны находятся белки, часть которых кодируется девятью вирусными генами, а часть, как и сама мембрана, захватывается из хозяйской клетки. Мембранные белки ВИЧ нужны, чтобы вирусная частица могла взаимодействовать с рецепторами клеток-мишеней, после чего мембраны вириона и клетки сливаются, а его содержимое попадает



Андрей Николаевич Взоров, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории энзимологии Института вирусологии имени Д.И.Ивановского при НИЦЭМ имени Н.Ф.Гамалеи, профессор кафедры иммунологии биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — изучение поверхностных белков ВИЧ и их способности вызывать иммунные ответы, а также конструирование вирусоподобных частиц для создания безопасных вакцин.
e-mail: anvzorov@mail.ru

внутри ее цитоплазмы. ВИЧ интегрирует свои гены в клеточный геном и вызывает латентную форму инфекции.

ВИЧ поражает в основном клетки иммунной системы, которые несут рецепторы CD4 (CD⁺ клетки). В ранних исследованиях, в которых молекулу CD4 идентифицировали в качестве рецептора ВИЧ и SIV, развитие синдрома приобретенного иммунного дефицита (СПИД) объяснялось потерей CD4⁺ Т-клеток. Сокращение этой субпопуляции иммунных клеток может привести к недостаточным антивирусным иммунным ответам, которые будут способствовать устойчивой вирусной репликации и утрате иммунного контроля. Однако на самом деле первоначальные адаптивные иммунные ответы (в частности CD8⁺ Т-клеток) на ВИЧ-инфекцию достаточно сильны. Это свидетельствует о том, что плохой адаптивный иммунный контроль над ВИЧ-инфекцией не может быть следствием потери CD4⁺ Т-клеток. Более того, ВИЧ целенаправленно воздействует на врожденный иммунитет, включая свои вирусные гены *vpr* и *vif*, которые противодействуют клеточным антивирусным белкам — тетерину и APOBEC3G (от англ. apolipoprotein B mRNA editing enzyme, catalytic polypeptide-like 3G) соответственно.

На фоне прогрессирующей ВИЧ-инфекции и развивающегося СПИДа организм больного теряет возможность защищаться, возникают вторичные оппортунистические заболевания, ко-

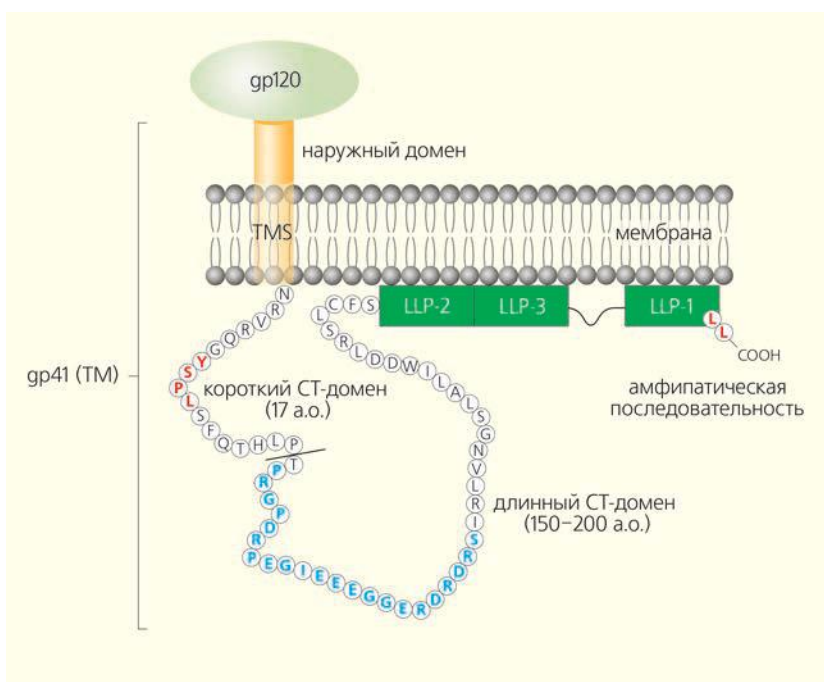
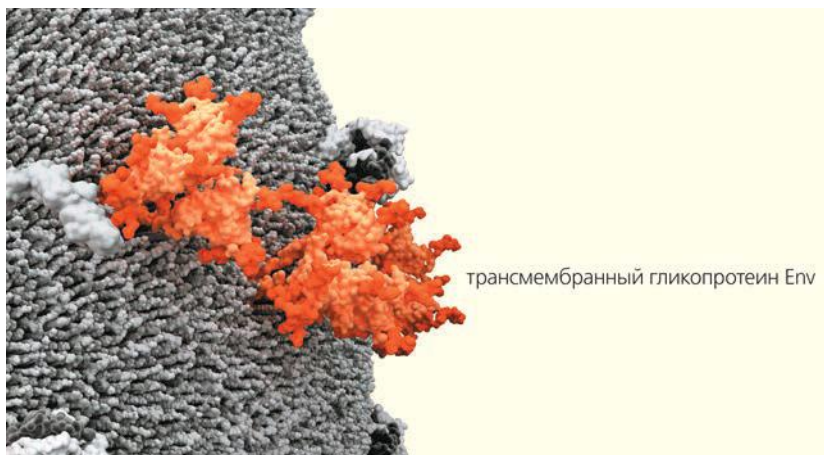


Рис.1. Структура трансмембранного гликопротеина Env (внизу) и фрагмент поверхности ВИЧ (©Visual Science, 2010) с белковыми комплексами gp120/gp41 (показаны оттенками оранжевого цвета). Гликопротеин Env состоит из двух субъединиц: варибельной поверхностной субъединицы gp120, которая находится на оболочке вирусных частиц и позволяет взаимодействовать с рецептором клетка-мишеней и определяет тропизм ВИЧ. Более консервативная трансмембранная (TM, transmembrane) субъединица gp41, которая относится к белкам слияния класса I (class I fusion protein), состоит из внешнего домена, имеющего нековалентную связь с gp120, и трансмембранного перекрывающего домена (TMS, от англ. transmembrane spanning domain) с единственным проходом α -спирали через мембрану и аминокислотной последовательностью СТ с функциональными мотивами, например, α -спиральными «лентивирусными литическими пептидами» (LLP-1, LLP-2, LLP-3).

которые без адекватного лечения приводят к смерти. По оценкам Всемирной организации здравоохранения*, со времени открытия ВИЧ в мире зара-

зилось более 70 млн человек, из которых более половины — умерли. В конце 2017 г. было зарегистрировано почти 37 млн инфицированных ВИЧ, из них более 1.2 млн — россияне.

Единственный доступный сейчас вид лечения ВИЧ-инфекции / СПИДа — высокоактивная антиретровирусная терапия, которая должна проводиться пожизненно, поскольку не избавляет больного от вируса. Решить эту проблему может лишь разработка эффективных вакцин и методов профилактики ВИЧ. В отличие от традиционных противовирусных вакцин, которые препятствуют развитию болезни, но позволяют инфекции начаться, вакцина против ВИЧ должна полностью ее предотвращать. Иными словами, для профилактики ВИЧ-инфекции необходимо наличие нейтрализующих антител, которые блокируют проникновение вируса в клетки.

Самая важная и критическая мишень для адаптивных иммунных реакций — шипы на вирусной частице, образованные гликопротеином Env (от англ. envelope protein), который состоит из двух субъединиц: варибельного белка gp120, обладающего функцией связывания с рецептором, и более консервативного трансмембранного gp41, удерживающего в мембране молекулу gp120 и опосредующего слияние с клеточной мембраной (рис.1). Функциональные сайты шипов защищены от иммунной системы хитроумными вирусными механизмами, обойти которые пока не удастся, поэтому эффективной вакцины, создающей протективный иммунитет против ВИЧ-инфекции, до сих пор не существует. Поверхностный гликопротеин Env вирус использует для проникновения в определенные клетки (тропизм), взаимодействуя с их специфическими рецепторами (CD4, CCR5, CXCR4). Возможность изменения тропизма ВИЧ во время инфекции обеспечивается биологическими свойствами Env — большой гибкостью и изменчивостью этого белка.

* www.who.int/gho/hiv/en

Биологические свойства Env

На начальных стадиях инфекции гликопротеин Env всех ретровирусов, связываясь с поверхностными клеточными рецепторами, способствует проникновению вириона в клетку путем мембранного слияния, на поздних — участвует в вирусной сборке [1]. Кроме того, есть доказательства внутриклеточного взаимодействия Env с матриксным белком, с клеточными белками, ассоциированными с мембранным микродоменом (липидным рафтом), а также прямого влияния гликопротеина на участок сборки и почкования вирусных частиц в поляризованных эпителиальных клетках [1, 2].

У лентивирусов, в отличие от других ретровирусов, Env содержат необычно длинный домен — цитоплазматический хвост (CT, от англ. cytoplasmic tail) из приблизительно 150–200 аминокислотных остатков (а.о.). Хвост трансмембранного белка может стать короче из-за досрочной остановки его синтеза, что используется ВИЧ или SIV как потенциальный механизм адаптации к новым типам клеток или ускользания от ингибиторов, блокирующих проникновение вирусов в клетки. Вирусные частицы с коротким CT дефектны на ранних этапах репликации, после проникновения вируса в клетки [1]. Для поддержки их инфекционности нужна более высокая множественность при заражении, чем для вируса с полноразмерным CT (для заражения клетки достаточно одной вирусной частицы с полноразмерным CT). К полезным свойствам короткого белка Env для вирусной популяции относится способность заражать больше видов клеток-мишеней. Это связано с повышенной способностью короткого белка Env к мембранному слиянию. Полноразмерный цитоплазматический хвост содержит множественные мотивы, включая три высококонсервативные α -спиральные лентивирусные литические пептидные домены (LLP, от англ. lentivirus lytic peptide) — LLP-1, LLP-2 и LLP-3 (см. рис.1), которые взаимодействуют с клеточной мембраной, снижают ее стабильность и проницаемость для ионов, а также влияют на патогенность (цитопатичность) вируса. Весь этот уникальный набор молекулярных механизмов Env-тримеров, из которых состоят шипы ВИЧ, нужен вирусной частице, повторю, для возможности проникать в клетки и заражать их разные популяции. На функциональной пластичности Env основано большое разнообразие иммуновариантов ВИЧ.

Как известно, ВИЧ обычно передается половым путем через слизистые (мукозные) оболочки, оснащенные мощными средствами защиты — различными лимфоидными клетками. В начале инфекции Env имеет компактную форму с короткими переменными петлями, при этом он остается белком высокопатогенного (трансмиссивного) штамма вируса-основателя. Именно эти свойства Env-тримера помогают вирусу эффективно преодолевать мукозный барьер. Таким образом ВИЧ удастся ус-

кользая от клеток иммунной системы и быть устойчивым (резистентным) к γ -интерферону, который обязан сдерживать распространение вируса. Дендритные клетки, которые должны предъявлять иммунной системе чужеродные антигены, хоть и эффективно захватывают вирусные частицы, но тем самым лишь ускоряют их перенос к клеткам-мишеням, поскольку ВИЧ при этом умудряется сохранить неизменное (интактное) состояние.

В процессе инфекции ген *env*, кодирующий gp120 и gp41, меняется так, чтобы вирус получил возможность взаимодействовать с рецепторами и корецепторами определенных клеток-мишеней. ВИЧ размножается (реплицируется) в активированных CD4⁺ T-клетках, а чтобы проникнуть в них, использует высокий уровень поверхностного рецептора CD4 и корецептора CCR5. На поздних стадиях инфекции у примерно 50% людей, заразившихся ВИЧ-1, шипы Env переключаются на CXCR4-корецепторы, позволяя вирусам проникать в другие популяции иммунных клеток (B- и T-лимфоциты, дендритные клетки, моноциты). Так, CD4-независимый ВИЧ начинает реплицироваться в популяциях клеток с низким содержанием CD4⁺ (макрофагах) или даже вовсе без них — в клетках микроглии в головном мозге, что вызывает неврологические расстройства у примерно 10% ВИЧ-инфицированных.

Включение Env в оболочку частиц при их сборке происходит в несколько этапов. Сначала субъединица gp41 взаимодействует с мембранным белком Rab11-FIP1C (от англ. Rab11 family interacting protein C1), а затем с матриксным белком Gag (от англ. group antigen), который формирует так называемую решетку длинного диапазона (англ. long-range lattice), захватывающую белки Env, что предотвращает их эндоцитоз и создает условия для размещения длинного домена gp41, а значит гарантирует включение Env в вирион [3]. Однако в случае мутаций гена, кодирующего этот домен, таких гарантий не будет, и тут преимущества короткого CT становятся очевидны: он способен преодолеть отсутствие специфического взаимодействия Env с матриксным белком (возможно, спасение Env связано со снятием стерического столкновения между Gag и CT). В результате эксперимента было установлено, что частицы ВИЧ-1 способны включать в оболочку белки Env различных вирусов, чьи гликопротеины имеют короткие цитоплазматические хвосты [4]. Для изучения процесса сборки частиц SIV, на каждой из которых от 15 до 130 шипов, и сравнения включения полноразмерного и усеченного белков Env была использована рекомбинантная экспрессионная система вируса осповакцины. Оказалось, что белки Env с коротким CT-доменом длиной 3 или 17 а.о. (CT-3 или CT-17) встраиваются в мембрану и высвобождаются из клеток в составе вирусоподобных частиц (VLP, от англ. virus-like particle) в 10 раз эффективнее, чем полноразмерный Env длиной 165 а.о. (рис.2).

Кроме того, белки Env с укороченным СТ способны группироваться на поверхности клеток, причем собираются в плотно упакованную структуру (плотнее, чем образуемая полноразмерным Env), что, видимо, способствует интенсивному включению белков Env с короткими СТ в состав VLP [5]. С помощью электронного микроскопа на вирусоподобных частицах идентифицирован слой шипов, который заметно выше на частицах с усеченным СТ (рис.2, *а*), чем на частицах с полноразмерным Env (рис.2, *б*). Аналогичные результаты получены для SIV с укороченными/полноразмерными белками Env.

На протяжении многих лет считалось, что белки поверхностных шипов, необходимые для развития инфекции, включаются в вирионы посредством прямого взаимодействия между их СТ-доменами и так называемыми кор-компонентами (матричными и капсидными белками) вируса. Однако позднее выяснилось, что это условие не распространяется на ретровирусы: РНК-вирусы могут накапливаться и в отсутствие белков шипов, достаточно наличия лишь вирусных кор-компонентов [6]. Это оказалось полезным для получения VLP (неинфекционных ретровирусоподобных частиц, имитирующих морфологию естественно циркулирующих вирионов), в состав которых обычно входит только полипротеин Gag, но можно включать и разные Env [6]. Важно, что использование VLP в качестве антигена усиливает первичный иммунный ответ.

Получен еще один интересный результат: размер СТ-домена гликопротеина Env вируса SIV может влиять на трехмерную структуру (конформацию) внешнего домена трансмембранной субъединицы [7]. При использовании непроницаемого для мембран реагента биотинилирования белков Env SIV_{mac239}, с полноразмерным или усеченным СТ на клеточных поверхностях с последующей имму-

нопреципитацией, в условиях, при которых на поверхности CD4⁺- или CD4⁻-клеток выявляли только усеченные варианты белка, полноразмерный gp41 обнаружить не удавалось. В то же время с помощью мембранно-непроницаемого реагента с радиоактивным йодом для мечения белков на поверхности клеток обнаруживали как gp41 полной длины, так и его усеченные варианты. Разницы в обнаружении поверхностных субъединиц, gp120, полноразмерных или усеченных белков не наблюдалось [8]. Эти результаты показали, что укорочение цитоплазматического домена гликопротеина оболочки SIV изменяет конформацию внешнего домена белка gp41. От длины СТ-домена зависят очень важные биологические характеристики SIV — активность репликации и чувствительность к нейтрализующим антителам [9]. Именно различная конформация белка Env, обусловленная длиной СТ, по-видимому, определяет различия в фенотипах вирионов SIV (например, чувствительный к нейтрализации фенотип имеет короткий СТ, а резистентный к нейтрализации — полноразмерный).

В процессе эволюции у оболочечных вирусов для мембранного слияния сформировался механизм, использующий энергию от необратимой модификации (рефолдинга) гликопротеинов Env: белки сначала образуют метастабильную форму, которая затем подвергается каскаду жестко регулируемых конформационных изменений, высвобождая белки, индуцирующие слияние в более низкое энергетическое состояние. Этот механизм для вирусного слияния — одnorазовый, он не требует АТФ в качестве источника энергии. Специальные исследования (конформационная фиксация лигандами, такими как молекулы CD4 или имитирующие CD4 антитела, и термодинамический анализ взаимодействий в gp120) показали тенденцию этой внешней субъединицы ВИЧ-1 к принятию CD4-связанной конформации, кото-

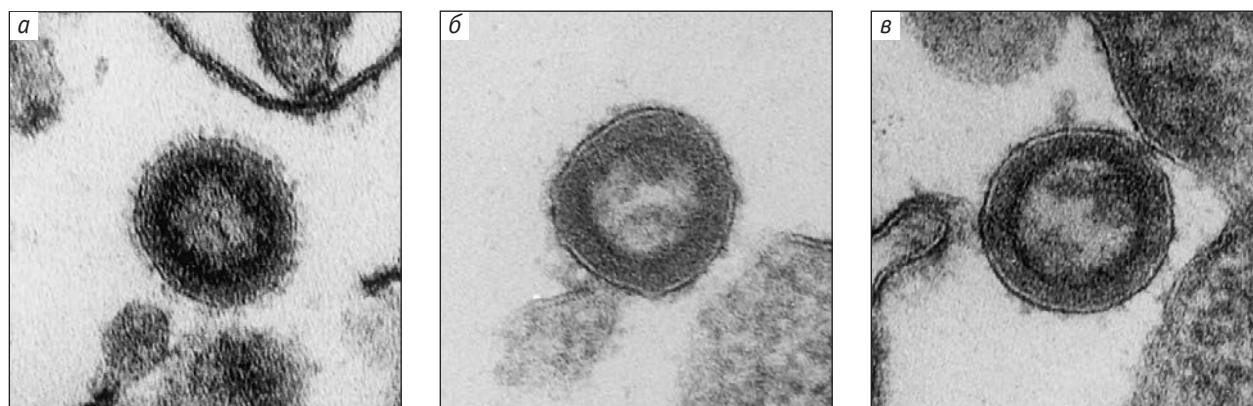


Рис.2. Микрофотографии тонких срезов зараженных фиксированных клеток, окрашенных дубильной кислотой для визуализации шипов Env с различной длиной цитоплазматического домена: *а* — вирусоподобные частицы из клеток с VV239gag-pol и VV239env(t), в которые встроены Env-тримеры с коротким (17 а.о.) СТ; *б* — VV239gag-pol и VV239env, в которые включены Env-тримеры с полным СТ, *в* — VLP из VV239gag-pol без Env-тримеров. Увел. ×140 тыс. (*а*); ×162 тыс. (*б, в*).

Фото А.Н.Взорова, Р.В.Компанс

рая сдерживается V1–V2- и V3-вариабельными петлями gp120. Другими словами, на поверхности вирусной частицы Env-тример находится в метастабильном состоянии, т.е. квазиустойчивом равновесии, в котором система может находиться длительное время благодаря сдерживающим факторам (V1, V2 и V3). Это напоминает сжатую пружину. Показано, что из такого метастабильного состояния Env-тример легко выходит и образует стабильную форму при связывании с CD4-рецептором. Именно при стабилизации Env-тримера открываются консервативные сайты (закрытые у метастабильной формы), или эпитопы для нейтрализующих антител. Однако многочисленные попытки получения открытых форм Env-тримеров путем удаления V1–V2-петель ни к чему не привели. Были получены Env-тримеры с искусственной конформацией, индуцирующей неспецифический иммунный ответ. Прорывными оказались исследования, в которых было показано, что изменения в аминокислотной последовательности трансмембранной субъединицы Env опосредованно влияли на функциональные свойства gp120 [6–9]. Если представить Env-белок в форме зонтика, то изменения в его ручке (gp41) отражаются на форме его купола (gp120). Амфипатическая последовательность LLP-2 в цитоплазматическом хвосте gp41 изменяла клеточный тропизм ВИЧ-1, модулируя специфичность вирусного рецептора, который распознается поверхностной субъединицей gp120 (см. рис.1) [10]. Таким образом, эти исследования показали, что специфическая последовательность в СТ-доме опосредованно влияет на функциональные области в поверхностной субъединице ВИЧ-1.

Более того, другое исследование доказывало, что СТ-домены могут индуцировать конформационные изменения в функциональных областях gp120 и модулировать тропизм рецептора, но не изменяют специфичность корцептора ВИЧ-1 [11]. Изменения в СТ-доме могут существенно влиять на функцию рецепторсвязывающих сегментов в gp120 и раскрывать сайты, связывающие корцептор в модифицированных белках Env. Так, было впервые продемонстрировано, что с помощью модификации в СТ-доме можно получить «открытые» формы Env-тримера с CD4-связанной конформацией.

Механизмы ускользания Env от иммунных ответов

Как только Env-тримеры достигают мембраны клетки (в которой они синтезируются), Env подвергается эндоцитозу через свои мотивы Y712SPL и L855L856 в цитоплазматическом домне, которые взаимодействуют с комплексом клеточных адаптерных белков AP-1 и AP-2. Поверхностная экспрессия белка Env, а также его стабильность на

поверхности клеток повышались при мутации *Tyr* (Y710S) остатка YXXA мотива в СТ-доме. При анализе CD8 Т-клеточных иммунных ответов у иммунизированных мышей эффекта на мутацию *Tyr* остатка не наблюдалась. Однако мутантные Env индуцировали более значительные уровни ответов специфических антител. Регуляция поверхностной клеточной экспрессии (уровень на клеточной поверхности уменьшается, при этом экспрессия гена, кодирующего Env белок, не изменяется) белка Env сигналами эндоцитоза в СТ-доме может служить стратегией ускользания ВИЧ от иммунной системы [11].

На поверхности вириона ВИЧ-1 выставляет всего около 7–14 шипов (Env). Столь небольшое их количество необычно для оболочечных вирусов: например, у вируса гриппа их до 400–500 шипов, у вируса везикулярного стоматита — примерно 1200, у вируса саркомы Роуса — до 118 шипов, у вируса лейкемии мыши — около 100. Недостаток шипов на ВИЧ-1 может быть адаптацией и ускользанием от гуморального иммунитета путем ограничения мультивалентного взаимодействия с рецепторами В-клеток и, как следствие, снижения ответа В-клеток, а также предотвращения двухвалентного связывания с антителами, которое

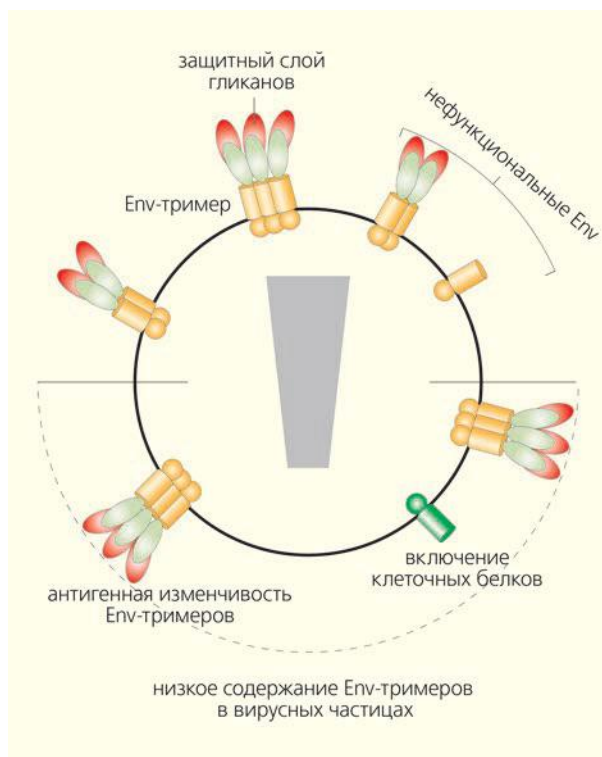


Рис.3. Механизмы ускользания Env-тримера. Низкое содержание Env-тримеров во внешней оболочке; антигенное разнообразие поверхностной субъединицы gp120; включение в оболочку нефункциональных продуктов Env-тримеров (непроцессированные gp160, обломки gp41 и т.д.); гликановый слой, закрывающий белковые эпитопы.

в противном случае могло усиливать нейтрализацию антителами (рис.3). Надо пояснить, что антитела класса IgG имеют два идентичных антигенсвязывающих сайта. В случае распознавания повторяющихся эпитопов, обнаруженных на поверхностях вирусных частиц (множественное включение шипов в оболочку ВИЧ), бивалентность IgG способствует повышению энергии связывания (аффинности).

Клеточные белки или Env с различными СТ-доменами могут быть включены в частицы ВИЧ, что полезно вирусу для защиты от иммунного ответа: у него появляется возможность прикрепляться к различным клеткам-мишеням посредством разнообразных белков Env и за счет приобретенных клеточных белков. Несмотря на частичное нарушение взаимодействия между белками Env и Gag, короткие формы белка Env влияют на сборку вирусных частиц. Укороченный СТ-домен белка Env вируса SIV влияет на включение клеточных и чужеродных вирусных белков в вирусную оболочку. Обычно короткие белки Env встраиваются в частицы и за счет стерического взаимодействия вытесняют включение клеточных и гетерологичных белков, которые содержатся в вирионах с полно-размерным белком Env [11]. Именно состав поверхностных мембранных белков и их свойства определяют фенотипы вирусных частиц.

Во время инфекции ВИЧ-1 нефункциональные белки Env — нерасщепленные или дефектные тримеры, диссоциированные мономеры gp120, промежуточные формы gp41 и продукты деградации белка Env, которые преимущественно экспонируют иммунодоминантные эпитопы для не нейтрализующих антител (non-NAbs, от англ. non-neutralizing antibodies) на поверхности ВИЧ, — также вызывают образование антител (см. рис.3) [12, 13]. Это еще один механизм ускользания ВИЧ, и нефункциональные формы Env служат для отвлечения внимания В-клеток от тримеров. Ответ антител по отношению к каждому из чужеродных антигенов на поверхности частиц зависит от их относительной доступности для связывания с антителами. Таким образом, высокая доступность нефункциональных форм Env может объяснить их очевидное иммунное доминирование. Антитела, которые реагируют на мономеры (gp120/gp41 или gp41), не вступают в реакцию с тримером, вероятно, потому, что их эпитопы находятся на другой легко доступной поверхности шипа Env.

Кроме того, на поздних стадиях инфекции, чаще всего, Env-шип имеет «ослабленную» конформацию: на фоне развития иммунодефицита у него снижается резистентность, он выступает на поверхности дополнительные эпитопы для нецелевых иммунных ответов, которые также блокируют образование нейтрализующих антител [8, 9, 11].

Оболочечный белок Env ВИЧ — наиболее N-гликозилированный белок из всех известных поверх-

ностных вирусных гликопротеинов. Один из главных механизмов ускользания ВИЧ от иммунного ответа — интенсивное и многоступенчатое гликозилирование тримера Env (см. рис.3) [14]. Его предшественник — gp160 — синтезируется в эндоплазматическом ретикулуме, где он гликозилируется и олигомеризуется в тримеры. Олигомеризация обеспечивает доставку gp160-тримеров в аппарат Гольджи, где в ходе процессинга гликанов боковые цепи олигосахаридов с высоким содержанием маннозы приобретают различные комплексные модификации. Однако олигомеризация Env в тримеры создает труднодоступные места, в которых последующий процессинг высокоманозных гликанов затруднен. В связи с тем, что именно в труднодоступных областях Env находятся чувствительные к нейтрализации эпитопы, высокоманозные гликаны еще больше осложняют их распознавание антителами. Получены доказательства, что гликозилирование маскирует антигенные участки на Env-шипе. Расщепление Env-тримеров клеточной протеазой фурином в аппарате Гольджи образует структуру гликопротеинов gp120-gp41. Некоторые нейтрализующие антитела широкого спектра могут распознавать N-связанные гликаны в высокоманозных участках Env-белка. Однако в связи с тем, что гликозилирование белка Env зависит от типа продуцирующих клеток и может изменяться в течение хронической ВИЧ-инфекции, такие антитела не обладают широкой нейтрализующей активностью [15]. Это также осложняет разработку вакцин, в которых в качестве антигена используется нативный Env-белок. Такие вакцинные препараты будут индуцировать гликанзависимые антитела, неэффективные для профилактики ВИЧ-инфекции.

Белок Env способен изменять свою собственную антигенность как в процессе слияния с клеточной мембраной, так и во время инфекции (см. рис.3). Стратегией ускользания ВИЧ от иммунной системы является не только труднодоступность консервативных эпитопов, но и Env-шип, который сам по себе служит движущейся мишенью для антител (рис.4). Для наблюдений за конформационными переходами нативных Env-шипов на поверхности вирионов ВИЧ-1 в режиме реального времени был использован одномолекулярный перенос энергии резонанса флуоресценции [16]. Изоляты ВИЧ представляют Env-шипы на поверхности вирионов в конформационной динамике от закрытых до ослабленных конформаций. В зависимости от вида изолята преобладает та или иная конформация. Например, для первичных изолятов характерна закрытая конформация. Белки с закрытой конформацией вызывают образование нейтрализующих антител широкого спектра действия. Для лабораторно-адаптированных изолятов ВИЧ характерна динамика из трех конформаций: закрытой, промежуточной и ослабленной (см. рис.4).

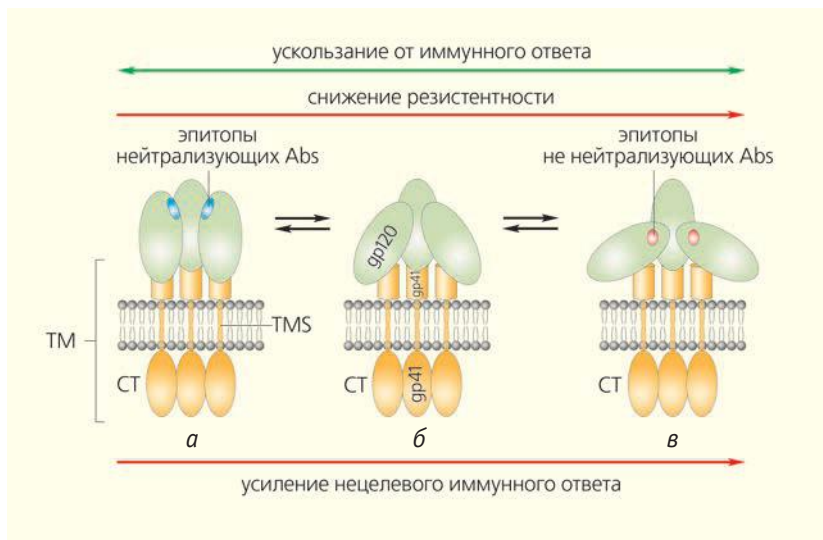


Рис.4. Конформационные формы природного Env-тримера. На оболочке ВИЧ Env-шипы находятся в динамике: в начале инфекции у изолятов преобладает закрытая форма конформации, на более поздних сроках Env-тример принимает все три формы — закрытая (а), частично ослабленная (б); ослабленная (в). Лабораторно-адаптированные или полученные у пациентов, больных СПИДом, изоляты имеют Env-тримеры ослабленной формы. Закрытая форма Env-тримера имеет самый высокий уровень резистентности (tier 3), экспонирует эпитопы для нейтрализующих антител и образует стерические ограничения для нецелевого иммунного ответа. Ослабленная форма Env-тримера (tier 1) чувствительна к нейтрализации, индуцирует нецелевой иммунный ответ.

Взаимодействие с иммунной системой и резистентность ВИЧ

ВИЧ-инфекция вызывает мощные клеточные и гуморальные иммунные ответы. Однако поразительная особенность заключается в том, что иммунная система человека не способна установить эффективный иммунный контроль. Сильные клеточные и гуморальные иммунные ответы не устраняют ВИЧ-инфекцию, более того, даже не способны эффективно контролировать вирусную репликацию. Лентивирусы, вызывающие СПИД у людей и азиатских «нечеловекообразных» приматов (NHP, от англ. nonhuman primates — все приматы, кроме человека), происходят из эндемичных SIV, которые у своих хозяев — африканских NHP — обычно не вызывают заболевания. Отсутствие патогенности не обусловлено способностью этих естественных хозяев иммунологически контролировать репликацию SIV, а скорее всего обусловлено их способностью к адаптации, которая предотвращает неблагоприятное воздействие высокой вирусной репликации на иммунную систему [17]. Это контрастирует с подавляющим большинством вирусных патогенов, для которых иммунный контроль репликации играет главную роль в предотвращении патогенных последствий (в том числе даже персистентных вирусов, таких как вирусы семейства герпесвирусов).

Нельзя сказать, что иммунная система поздно реагирует на ранние события ВИЧ-инфекции. Более того, наблюдается ранний интенсивный цитокиновый шторм. Однако при острой инфекции ВИЧ-1 он имеет иммунопатологические последствия, стимулирует иммунную активацию, репликацию вируса и утрату CD4⁺ Т-клеток [18]. Это происходит после двух недель инфекции при распространении ВИЧ в лимфатических тканях. Интересно, что в течение той же фазы при инфекции, вызванной вирусом гепатита В, наблюдается сравнительно небольшое отклонение в уровнях цитокинов в плазме, а при остром гепатите С — отсроченный ответ средней величины. Это указывает на то, что быстрая активация системного цитокинового каскада не может считаться необходимым условием для удаления вируса. В начале инфекции противовирусные ответы антител также очень сильны (рис.5), тем не менее дальнейшие события показывают их не-

эффективность в защите от развития заболевания. Аутогенные нейтрализующие антитела вырабатываются в ответ на Env-тример трансмиссивного штамма основателя ВИЧ. Эти антитела ингибируют трансмиссионный вирус, но в то же время вызывают появление ускользающих мутаций в Env-тримере и образование нового иммунного варианта ВИЧ (см. рис.5). В результате формируются нейтрализующие антитела, которые ингибируют этот вариант ВИЧ, но стимулирует ускользающие мутации в Env-тримере. Эта ситуация повторяется многократно. В конце концов нейтрализующие антитела широкого спектра действия возникают как результат экстенсивных соматических гипермутаций иммунных клеток. Через два-три года после начала инфекции нейтрализующие антитела широкого спектра действия (bNAbs) вырабатываются у 10–30% пациентов с хронической формой ВИЧ-инфекции, но они неэффективны у этих пациентов. У большинства инфицированных антивирусные CD8⁺ Т-клеточные ответы также неэффективны. Это происходит даже в том случае, если ответы нацелены на вирусные варианты без видимых дефектов и не связаны с мутациями в последовательностях. Таким образом, CD8⁺ Т-клеточные ответы не могут достичь высокого уровня эффекторной реакции к эпитопам-мишеням для воздействия на репликацию вируса.

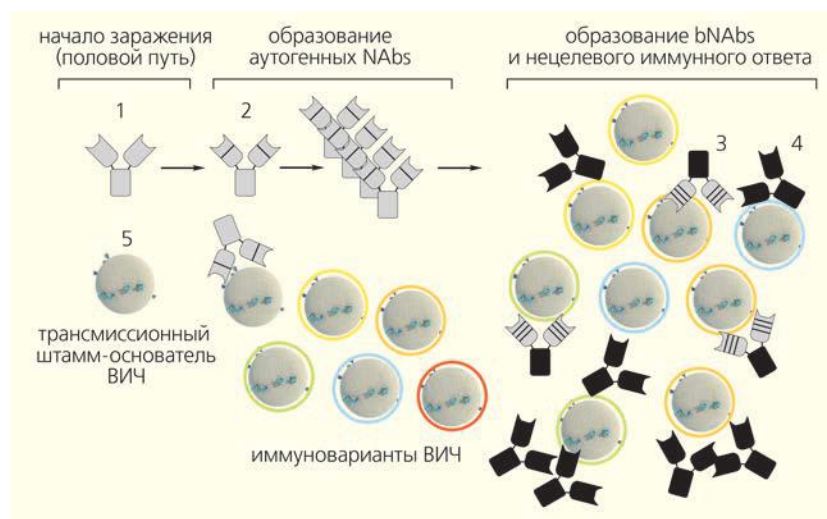


Рис.5. Ответ анти-ВИЧ антител — сильный, но неэффективный. Первичные адаптивные эффекторные иммунные ответы развиваются при остром заражении ВИЧ/SIV. Наблюдается сильное селективное давление на вирусную популяцию, приводящее к замене последовательности вируса-основателя на варианты ускользающих вирусов. Неспецифический иммунный ответ: слабо нейтрализующие или не нейтрализующие антитела составляют 85%. Нейтрализующие антитела широкого спектра действия (bNAbs) составляют 15%. 1 — антитела-предшественники; 2 — нейтрализующие аутогенные антитела; 3 — нейтрализующие антитела широкого спектра действия; 4 — нецелевой иммунный ответ; 5 — вирус-основатель.

Механизмы дифференцировки Т-клеток памяти имеют основополагающее значение для иммунопатогенеза ВИЧ [19]. Поскольку ВИЧ является CCR5-тропным, дифференцировка Т-клеток памяти обеспечивает ВИЧ мишеням эффекторные CD4⁺ клетки памяти, которые только на поздних стадиях дифференцировки синтезируют высокий уровень CCR5, чувствительны для ВИЧ, при этом популяция их предшественников, центральные Т-клетки памяти благодаря низкому содержанию CCR5 защищены от ВИЧ-инфекции. Где у ВИЧ «ахиллесова пята»? Все больше доказательств того, что ранняя стадия передачи ВИЧ уязвима для иммунного вмешательства. «CCR5-тропизм» фокусирует ВИЧ/SIV инфекцию на дифференцированных CD4⁺ эффекторных Т-клетках памяти. Напомню, эффекторные CD4⁺ Т-клетки памяти — это пополняемый резервуар потенциальных клеток мишеней для ВИЧ. Пациенты, которым были пересажены трансплантаты костного мозга от доноров, не имеющих од-

не способны блокировать проникновение вируса в клетку. Инфекция развивается после окончания действия таких векторов.

Многочисленные механизмы ускользания ВИЧ от иммунной системы, связанные с Env-тримерами, и отсутствие прецедента естественного иммунитета, ведущего к удалению ВИЧ и устойчивой иммунной защите от суперинфекции, указывают на то, что разработка эффективной вакцины против ВИЧ/СПИДа потребует разработки новых иммуногенов, вызывающих защитный иммунный ответ против ВИЧ, который не смогла создать природа. Новым подходам к созданию такой вакцины будет посвящена следующая статья — в ноябрьском номере «Природы». ■

* Prime-boost — метод иммунизации в несколько этапов и с использованием разных типов препаратов, причем первые дозы активируют иммунный ответ, а последующие — усиливают и закрепляют эффект.

Литература / References

1. Vzorov A.N., Weidmann A., Kozyr N.L. et al. Role of the long cytoplasmic domain of the SIV Env glycoprotein in early and late stages of infection. *Retrovirology*. 2007; 4: 94. Doi:10.1186/1742-4690-4-94.
2. Owens R.J., Compans R.W. Expression of the human immunodeficiency virus envelope glycoprotein is restricted to basolateral surfaces of polarized epithelial cells. *J. Virol.* 1989; 63(2): 978–982. Available at: <https://jvi.asm.org/content/63/2/978>.
3. Tedbury P.R., Novikova M., Ablan S.D., Freed E.O. Biochemical evidence of a role for matrix trimerization in HIV-1 envelope glycoprotein incorporation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2016; 113(2): E182–E190. Doi:10.1073/pnas.1516618113.

4. *Chertova E., Bess J.W., Jr. et al.* Envelope glycoprotein incorporation, not shedding of surface envelope glycoprotein (gp120/SU), is the primary determinant of SU content of purified human immunodeficiency virus type 1 and simian immunodeficiency virus. *J. Virol.* 2002; 76(11): 5315–5325. Doi:10.1128/JVI.76.11.5315-5325.2002.
5. *Vzorov A.N., Compans R.W.* Assembly and release of SIV env proteins with full-length or truncated cytoplasmic domains. *Virology.* 1996; 221(1): 22–33. Doi:10.1006/viro.1996.0349.
6. *Взоров А.Н., Тенцов Ю.Ю., Григорьев В.Б. и др.* Образование вирусоподобных частиц белков Gag ВИЧ-1, экспрессируемых рекомбинантным вирусом осповакцины. Молекулярная биология. 1990; 24(6): 1666–1674. [*Vzorov A.N., Tentsov Yu.Yu., Grigor'ev V.B. et al.* Formation of virus-like particles by HIV-1 Gag proteins, expressed by a recombinant vaccinia virus. *Mol. Biol.* 1990; 24(6): 1666–1674. (In Russ.)]
7. *Spies C.P., Ritter G.D., Jr. et al.* Truncation of the cytoplasmic domain of the simian immunodeficiency virus envelope glycoprotein alters the conformation of the external domain. *J. Virol.* 1994; 68(2): 585–591. Available at: <https://jvi.asm.org/content/68/2/585>.
8. *Vzorov A.N., Compans R.W.* Effect of the cytoplasmic domain of the simian immunodeficiency virus envelope protein on incorporation of heterologous envelope proteins and sensitivity to neutralization. *J. Virol.* 2000; 74(18): 8219–8225. Doi:10.1128/JVI.74.18.8219-8225.2000.
9. *Vzorov A.N., Gernert K.M., Compans R.W.* Multiple domains of the SIV Env protein determine virus replication efficiency and neutralization sensitivity. *Virology.* 2005; 332(1): 89–101. Doi:10.1016/j.virol.2004.10.044.
10. *Vzorov A.N., Yang C., Compans R.W.* An amphipathic sequence in the cytoplasmic tail of HIV-1 Env alters cell tropism and modulates viral receptor specificity. *Acta Virol.* 2015; 59(3): 209–220. Doi:10.4149/av_2015_03_209.
11. *Ye L., Bu Z., Vzorov A. et al.* Surface stability and immunogenicity of the human immunodeficiency virus envelope glycoprotein: role of the cytoplasmic domain. *J. Virol.* 2004; 78(24): 13409–13419. Doi:10.1128/JVI.78.24.13409-13419.2004.
12. *Moore P.L., Crooks E.T., Porter L. et al.* Nature of nonfunctional envelope proteins on the surface of human immunodeficiency virus type 1. *J. Virol.* 2006; 80(5): 2515–2528. Doi:10.1128/JVI.80.5.2515-2528.2006.
13. *Parren P.W., Burton D.R., Sattentau Q.J.* HIV-1 antibody — debris or virion? *Nat. Med.* 1997; 3(4): 366–367. Doi:10.1038/nm0497-366d.
14. *Quan F.S., Sailaja G., Skountzou I. et al.* Immunogenicity of virus-like particles containing modified human immunodeficiency virus envelope proteins. *Vaccine.* 2007; 25(19): 3841–3850. Doi:10.1016/j.vaccine.2007.01.107.
15. *Lanteri M., Giordanengo V., Hiraoka N. et al.* Altered T cell surface glycosylation in HIV-1 infection results in increased susceptibility to galectin-1-induced cell death. *Glycobiology.* 2003; 13(12): 909–918. Doi:10.1093/glycob/cwg110.
16. *Munro J.B., Gorman J., Ma X. et al.* Conformational dynamics of single HIV-1 envelope trimers on the surface of native virions. *Science.* 2014; 346(6210): 759–763. Doi:10.1126/science.1254426.
17. *Chabroudi A., Silvestri G.* What pediatric nonprogressors and natural SIV hosts teach us about HIV. *Sci. Transl. Med.* 2016; 8(358): 358fs316. Doi:10.1126/scitranslmed.aaj1874.
18. *Stacey A.R., Norris P.J., Qin L. et al.* Induction of a striking systemic cytokine cascade prior to peak viremia in acute human immunodeficiency virus type 1 infection, in contrast to more modest and delayed responses in acute hepatitis B and C virus infections. *J. Virol.* 2009; 83(8): 3719–3733. Doi:10.1128/JVI.01844-08.
19. *Grossman Z., Meier-Schellersheim M., Paul W.E., Picker L.J.* Pathogenesis of HIV infection: what the virus spares is as important as what it destroys. *Nat. Med.* 2006; 12(3): 289–295. Doi:10.1038/nm1380.

HIV Resistance and Its Relationship with the Immune System

A.N.Vzorov^{1,2}

¹*Ivanovsky Institute of Virology, Gamaleya Federal Research Center of Epidemiology and Microbiology (Moscow, Russia)*

²*Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)*

HIV is one of the most resistant viruses. There is no protective immune response for HIV infection. The ineffectiveness of the adaptive immune response is associated with Env-trimers. The Env glycoprotein, forming the HIV spike trimer, is a transmembrane protein with an unusually long 150–200 a.a. cytoplasmic domain. This cytoplasmic domain has several functional motifs affecting the functions of the Env trimer proteins, which have a number of mechanisms for evading the immune system. They include: a low content of Env-trimers in the envelope of HIV; incorporation of non-functional forms of Env-trimers into the envelope of HIV, causing an untargeted immune response; antigenic variability of Env-trimers during the course of infection, during membrane fusion with the target cell; by shielding some conservative epitopes for neutralizing antibodies; the conformation dynamics of Env-trimers; epitope masking by glycans.

Keywords: HIV, glycoprotein, immune response, Env-trimers, cytoplasmic domain, viral escape mechanism.

Москва-река сегодня и завтра

Н.М.Щеголькова^{1,2}, М.А.Козлова², А.В.Емельянов², К.Н.Шмонин¹

¹Факультет почвоведения Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

²Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)

Авторы статьи, используя базу данных гидрохимического мониторинга Москва-реки за 1971–1982 и 1995–2018 гг., проанализировали изменение качества ее воды за последние 25 лет. Для оценки нагрузки, оказываемой на Москва-реку городом, произведен расчет скорости самоочищения реки в 1999–2012 гг. и удельного расхода реки-водоприемника в период с середины XVIII в. до нашего времени. Авторы показали, что состояние речной экосистемы приблизилось к критическому, процессы ее самоочищения практически остановились с 2006 г.

Ключевые слова: городская река, самоочищение, гидрохимические показатели, экосистема реки, очистные сооружения.

Немноговодные реки мегаполисов априори считаются загрязненными. Попробуем разобраться, оправдан ли подобный фатализм в отношении главного городского водного ресурса, и разумно ли считать подобное отношение нормой.

Города очищают воду: немного истории

Несоответствие масштабов Москва-реки и одноименного города, оказывающего на нее нагрузку, создавало проблемы уже с середины XIX в.: речная вода не годилась для питьевых целей, летом дурно пахла, и горожане, конечно же, принимали меры.

Все современные мегаполисы, и в их числе российская столица, прошли несколько стадий борьбы за чистоту своих водных артерий. Первоначально стоки просто разбавляли — пока их доля в составе речной воды (точнее, в ее расходе*) была невелика. Но со временем не замечать их присутствие стало невозможно, особенно в межень**, и в конце XIX в. были построены первые очистные сооружения. Тогда же появились соответствующие технологии, причем значительный вклад российских ученых в их разработку свидетельствует о том, что наша страна занимала одну

из ведущих позиций в этой сфере. Речь идет о полях фильтрации и орошения. Специалисты взяли за основу процессы естественного самоочищения ландшафта во время продвижения воды через почвенно-грунтовый слой, локализовали их и сделали управляемыми. Бытовые стоки подвергались биохимическому окислению с трансформацией соединений азота. Исследованием этих процессов на первых полях фильтрации занимались известные биологи и почвоведы — В.Р.Вильямс, Я.Я.Никитинский, С.Н.Строганов [1–2] и др.

Именно со строительства первых очистных сооружений началось «инженерное» использование работы микроорганизмов в очистке окружающей среды. В Москве в 1899 г. начали действовать Люблинские поля фильтрации, а в 1914 г. — Люберецкие. Впоследствии эти и другие введенные в начале и середине XX в. очистные сооружения (Кожуховская станция аэрофильтрации, Филевская, Закрестовская, Щукинская, Кунцевская, Тушинская, Люблинская станции аэрации) позволили уменьшить неприятный запах воды за счет изменения кислородного режима реки. Технологическая задача на тот момент сводилась к частичному окислению органического вещества и удалению большей части взвешенных веществ. Однако поступление в реку биогенных элементов (азота и фосфора) продолжалось, а значит, нагрузка*** на речные экосистемы практически не снизилась.

* Расход воды (в водотоке) — объем воды, протекающей через поперечное сечение водотока за единицу времени. Измеряется в расходных единицах (м³/с). В гидрологии используются понятия максимального, среднегодового, минимального и других расходов воды.

** Межень — самый низкий уровень воды в реке, озере, а также период самого низкого уровня середины лета.

© Щеголькова Н.М., Козлова М.А., Емельянов А.В., Шмонин К.Н., 2018

*** Нагрузка на реку — величина, характеризующая либо отношение объема сточных вод, сбрасываемых в бассейн реки, к стоку реки в этом створе (створ — условное поперечное сечение водотока, используемое для оценок и прогноза качества воды), либо количество загрязняющих веществ, поступающих в единицу времени (в абсолютных единицах, т/сут).



Наталья Михайловна Щеголькова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова и Института водных проблем РАН. Научные интересы — экология городских рек, фитоочистные сооружения, структура прокариотных сообществ очистных сооружений, биогеохимические потоки в урбоэкосистеме.
e-mail: nsbegolkova@mail.ru



Мария Алексеевна Козлова, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных проблем РАН. Области научных интересов: оценка качества вод; анализ биологической активности, включая токсичность, загрязняющих веществ; лекарственное загрязнение природных и сточных вод; развитие методов оценки экологических рисков.



Алексей Владимирович Емельянов, эколог, выпускник РУДН и Университета Блеза Паскаля (Клермон-Ферран, Франция), аспирант и младший научный сотрудник лаборатории охраны вод Института водных проблем РАН. Сфера научных интересов — качество вод, биологическая очистка вод, морфология русла в формировании местобитания биоты, экологическое право.



Кирилл Николаевич Шмонин, студент бакалавриата факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — урбоэкология, экология городских рек.

Поля орошения и фильтрации занимали в городах слишком много места. Затраты, с этим связанные, в определенной мере окупались выращиванием овощных культур на отведенных для водочистки землях, однако вскоре развитие промышленности, поставляющей токсичные стоки в общую систему канализации, заставило отказаться от ландшафтов с естественным дренажом. Специалисты сосредоточили процессы очистки воды в замкнутых реакторах, ограниченных бетонными стенами, и концентрация микроорганизмов

в единице объема очистного сооружения возросла в сотни раз. Этот плавающий в аэротенках биоценоз назвали «активный ил». Первоначально такие сооружения, или «станции аэрации», очищали воду от тех же соединений (орошения), но более эффективно. В толщу воды с активным илом подавали воздух под давлением, ускоряя окисление органического вещества. Однако азот и фосфор по-прежнему целенаправленно не удаляли.

Города росли, увеличивался объем сточных вод, усиливалась нагрузка на речные экосистемы. В озерах и морях, принимающих воды рек, началось чрезмерное развитие микро- и макроводорослей. В итоге в середине 20-го столетия в мире заговорили про эвтрофикацию водоемов [3]. Летом зацветали и реки — по заводям, в заливах. Теперь научное сообщество сконцентрировало усилия на поисках новой технологии, позволяющей решить проблему радикально. И выход был найден — биологическая очистка сточных вод, позволяющая удалять биогенные элементы. Одними из первых были построены биологические очистные сооружения в Южной Африке: исследователи Кейптаунского университета предложили технологические схемы с несколькими модификациями (Prorendox, Three-stage Bardenphlo process), известные в мире как кейптаунский, или UCT-процесс (University of Cape Town). Затем такие сооружения (с модификациями и без) появились в США, Канаде, Дании, Португалии, Великобритании. Примененные технологии

основаны на процессах нитрификации* и денитрификации**, которые реализуются последова-

* Нитрификация — двухстадийный микробиологический процесс окисления аммиака до азотистой кислоты (нитриты) и далее до азотной кислоты (нитраты).

** Денитрификация (восстановление нитрата) — сумма микробиологических процессов восстановления нитратов до нитритов и далее до газообразных оксидов и молекулярного азота. В результате азот возвращается в атмосферу и становится недоступным большинству организмов.



Москва-река в черте города.

тельно в проточных реакторах (пространственно разделены) либо протекают в реакторах смешения, разделенные во времени. Биологическое удаление фосфора реализуется за счет формирования специфического бактериального сообщества, которое в определенных условиях накапливает соли фосфатов в бактериальных клетках. Удаляют фосфаты также и химическим способом, используя катионы железа или алюминия.

В XXI в. специалисты АО «Мосводоканал» творчески усовершенствовали разработанные за рубежом схемы, адаптировав их к особенностям столичных сточных вод — ведь, к слову сказать, сточные воды всех городов имеют индивидуальные особенности, которые зависят от природных, социальных и культурных факторов [1, 4]. Завершение реконструкции известных москвичам Курьяновских и Люберецких очистных сооружений планируется в 2018 и 2020 гг. соответственно.

Но вернемся к Москва-реке, которая с начала XX в. зарегулирована плотинами практически полностью. Бытовые стоки составляют сегодня около 50% ее суммарного расхода в устье.

Индивидуальность столицы «в зеркале» сточных вод

Для того чтобы определить, здоров или болен человек, положено измерить его температуру, выполнить анализы крови и прочее. А как оценить благополучие реки? И что в данном случае считать здоровьем или недугом? Важной характерис-

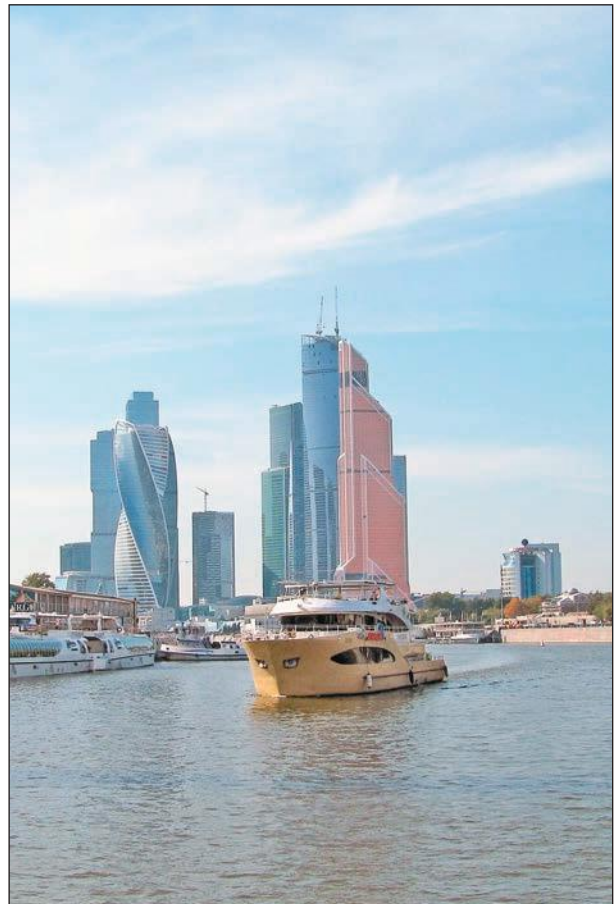
тикой всех рек считается их способность к биологическому самоочищению. Быстро избавиться от поступивших извне загрязняющих веществ может только целостная экосистема, в которой организмы-деструкторы разлагают «мертвое» органическое вещество (детрит), микро- и макроводоросли ассимилируют минеральный азот и фосфор, зоопланктон потребляет детрит и одноклеточные водоросли, рыбы питаются детритом, водорослями и зоопланктоном, а микроорганизмы помогают деструкторам, снабжая водоросли доступными питательными веществами и «подъедая» за рыбами продукты жизнедеятельности. Человек своими сточными водами серьезно нарушает баланс целостного «организма» речной экосистемы, ведь в загрязненной реке резко возрастает роль микрофлоры, значительно повышается доля микробной биомассы. Кроме того, «упрощается» структура экосистемы: некоторые виды живых организмов (или даже большинство из них) исчезают с появлением токсикантов, остаются лишь самые стойкие. Возникает вопрос: способна экосистема Москва-реки возвращаться в естественное, здоровое состояние и самоочищаться?

Оценка структуры речной экосистемы — занятие чрезвычайно трудоемкое и дорогое. Даже Москва не может себе позволить проводить такие исследования регулярно: последнее комплексное изучение одноименной реки проводилось в 1996 г. [5]. Однако «градусник» ей ставится регулярно. В качестве такового служат регулярные гидрохимические обследования реки по всему руслу. Проводят их под руководством Департаментов природо-

пользования и охраны окружающей среды г. Москвы и Московской области. В конце года готовятся доклады о состоянии окружающей среды этих регионов, где дается оценка «здоровью» реки.

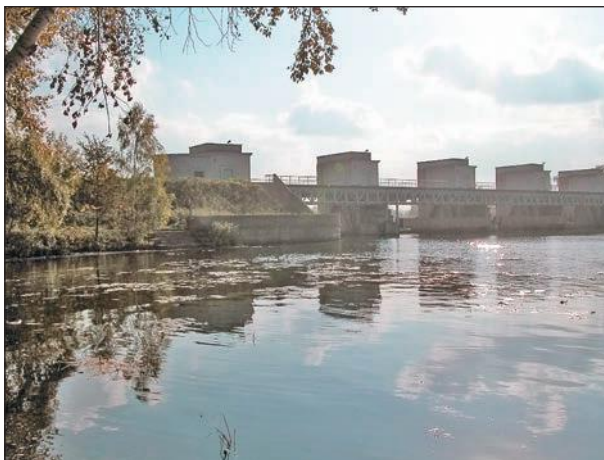
Вы, вероятно, помните, как иной раз, разглядывая результаты своего анализа крови, пытались понять, что означает каждая цифра? Для далеких от медицины людей на лабораторных бланках в столбце «норма» даются пояснения. Разобраться в данных химического анализа речной воды точно так же помогают специальные справочники ПДК (предельно допустимых концентраций), по которым профессионалы определяют, пригодна ли вода для питья, купания или рыбозабеждения. Самые жесткие (низкие) нормативы — для рыбозабеждения, самые мягкие — для купания (так называемые культурно-бытовые ПДК). Подсчитав показатели, превышающие нормативы, ученые выносят вердикт: вода чистая, слабо загрязненная, загрязненная, грязная. Классификаций ее качества (построенных на расчетах отношений концентраций загрязняющих веществ к ПДК) очень много, и в них, как правило, пять или шесть основных градаций — от «чистой» до «чрезвычайно (экстремально) грязной».

Существуют три основных источника получения ежегодной информации о степени загрязнения Москва-реки: государственные доклады о состоянии окружающей среды, информационные выпуски «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области», «Доклады о состоянии окружающей среды в городе Москве». Просмотрев эти документы за последние 10 лет (все они в открытом доступе), вы вдруг обнаруживаете, что в первых двух столичная река позиционируется как один из самых или самый грязный (в Московской обл.) водоток, а в третьем документе она имеет статус условно чистой. Парадокс легко объясним: жесткий вариант связан с ПДК для рыбохозяйственных водоемов, а более мягкий —



Столица растет.

с ПДК для водоемов культурно-бытового назначения. Для обоснования перехода на вторые нормативы в 2002 г. в Москве был принят специальный документ «Методические указания по оценке степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям». Принятие докумен-



Гидротехнические сооружения на Москва-реке в черте города: Перервинская плотина (слева), выпуск Курьяновских очистных сооружений.

та сопровождалось массовыми публикациями о том, что Москва-река не может быть объектом рыбозаведения.

Между тем по всей реке ведется любительское и спортивное рыболовство. Более того, в «Докладах о состоянии окружающей среды в городе Москве» ежегодно описываются редкие виды рыб, обитающие в столичной реке. Исследования ихтиологов Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, проведенные в 2003–2005 гг., показали, что плотность рыбной популяции вблизи выпуска Курьяновских очистных сооружений в 2005 г. была сравнима с аналогичным показателем самых успешных рыбозаводных прудов [6]. Данных о качестве этой рыбы, к сожалению, не много [4], а данных об изменении видового состава рыбы в нижнем течении реки за последние 10 лет и вовсе нет.

Обращаясь к данным многолетнего гидрохимического мониторинга реки, нельзя не заметить контрастных колебаний качества ее воды — периодических ухудшений и улучшений на протяжении последних 25 лет. При этом самой наглядной демонстрацией состояния экосистемы служит динамика соответствующих показателей в устье реки — результирующем створе, где смешались все стоки, поступившие от города и области. Если же выбрать на реке два створа, в которых регулярно (хотя бы раз в месяц) производятся измерения качества воды (т.е. концентрации какого-либо загрязняющего вещества в миллиграммах на литр), и рассчитать (исходя из гидрологических показателей) время движения потока от одного из них до другого, то мы сможем определить скорость самоочищения и (или) загрязнения реки на этом отрезке: достаточно разделить разницу концентраций веществ в верхнем и нижнем створах на время, за которое вода преодолела расстояние между ними.

Наиболее корректными сведениями о качестве воды в устье можно считать данные гидрохимического мониторинга, проводимого Центральным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в створе «Коломна» (в 7 км от устья Москва-реки). Мы использовали материалы 1995–2018 гг.* и за 1971–1982 гг. (для сравнения).

Скорости самоочищения рассчитывались на основе данных производственного экологического мониторинга, проведенного Мосводоканалом в 1998–2012 гг. Первый створ характеризует воду в месте смешения стока Курьяновских очистных сооружений (КОС) и Москва-реки, второй расположен выше выпусков Люберецких очистных со-

оружений (ЛОС). Заметим: на этом участке реки существует несколько рукотворных расширений русла — прежде всего, Братеевское и Бесединское — они появились при добыче песка для строительства города и с самого начала служат отстойниками для илистых и песчаных частиц. Кроме этих мест, донные отложения формируются по всему руслу, что было показано ранее с использованием сейсмоакустических методов [4].

В период заполнения природных «отстойников» в русле зарегулированной реки происходит ее самоочищение за счет осаждения взвешенных частиц и последующей переработки органического вещества донных отложений микроорганизмами, моллюсками, рыбами. Но если депонируются токсичные компоненты, которые «не по зубам» речной экосистеме на ее высших трофических уровнях, то трансформацией органического вещества занимается преимущественно бактериальное сообщество. В этом случае формируются анаэробный придонный слой, и накопленные осадки становятся источниками так называемого вторичного загрязнения реки.

О чем рассказал мониторинг: тревожные показатели в створе «Коломна»

В створ «Коломна» вода поступает через 7–10 сут после смешения очищенных стоков КОС и ЛОС с речной водой (рис.1). Начиная с 1999 г. содержание растворенного кислорода в этом створе неуклонно снижалось — в среднем с 10 до 8 мг/л. За тот же период биологическое и химическое потребление кислорода (БПК, ХПК), обусловленное концентрацией органического вещества в сточных водах, увеличилось примерно вдвое, если сравнивать с 2006–2007 гг. (рис.2). Следует напомнить, что за последние 30 лет содержание растворенного кислорода в реке не опускалось ниже 4 мг/л. Однако начиная с 2007 г. подобная кислородная аномалия перестает быть редкостью в летний период.

Проанализируем динамику содержания форм азота в речной воде в 1995–2018 гг. Если представить изменения суммарной концентрации азота графически, то видно, что указанный период условно делится на три временных отрезка: 1995–1998, 1999–2004 и 2005–2018 гг. (рис.3). И на втором этапе суммарная концентрация азота минимальна — в среднем около 3 мг/л, тогда как на первом она составляет около 7 мг/л, на третьем — около 10 мг/л. Эти пять лет (с 1999 по 2004 г.) можно характеризовать как самое благополучное состояние реки, поскольку именно тогда ее видовое разнообразие и численность всех гидробионтов были максимальными, так же как и скорость самоочищения, о чем более подробно ниже. В последние же годы значительно увеличилось содержание в речной воде не только суммарного азота, но и нитритов — наиболее токсичных его соедине-

* Гидрохимические данные по створу «Коломна» за 1995–2018 гг. предоставлены Московским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды по запросу Мосводоканала (до 2012 г.) и Института водных проблем РАН (за 2012–2018 гг.); сведения за 1971–1982 гг. взяты из гидрохимических бюллетеней Госкомитета по гидрометеорологии и контролю природной среды.

ний. Начиная с 2005 г. концентрация нитритов в среднем в восемь раз превышает установленное для рыбохозяйственных водоемов предельно допустимое значение (ПДК), и почти каждое лето максимальные показатели соответствуют 40-кратному превышению ПДК.

Соотношение форм азота в воде может характеризовать не только ее загрязненность, но и способность реки к самоочищению. Дело в том, что бактерии-нитрификаторы — довольно чувствительный индикатор токсичности среды, и развитие процесса нитрификации служит критерием благополучия речно-

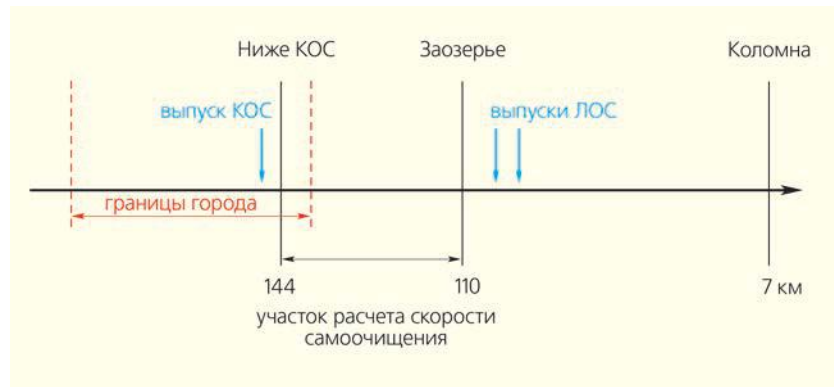


Рис.1. Пункты экологического мониторинга на Москва-реке, по которым рассчитывались скорости самоочищения. Мониторинг проводился специалистами Мосводоканала и Центрального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (створ Коломна). По горизонтальной оси обозначено расстояние (в км) от устья Москва-реки до каждого из трех створов (пунктов мониторинга).

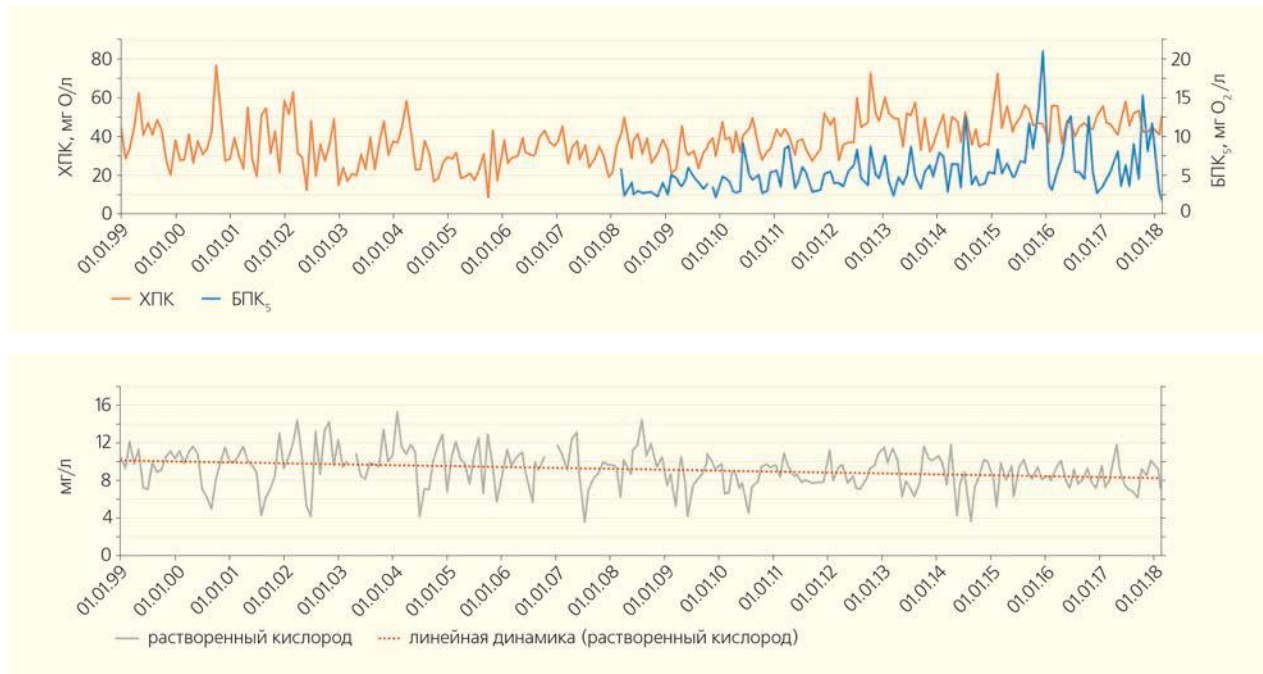


Рис.2. Динамика содержания органического вещества (вверху) и растворенного кислорода в воде створа (внизу) «Коломна» Москва-реки в 1999–2018 гг. БПК₅ — биологическое потребление кислорода за 5 суток.



Рис.3. Динамика содержания минеральных форм азота в воде створа «Коломна» Москва-реки в 1995–2018 гг.



Рис.4. Динамика концентрации минеральных соединений азота в воде створа «Коломна» Москва-реки в 1995–2018 и в 1971–1982 гг.

го биоценоза. Анализ изменения концентрации четырех форм азота в Москва-реке в 1971–1982 и 1995–2018 гг. показывает, что в 1970-е годы азот органический и азот аммонийный абсолютно преобладали (рис.4). Значения показателей содержания нитратов и нитритов в воде в тот период были сравнимы с погрешностью измерения. Однако с 1995 г. картина существенно изменилась: нитраты и нитриты стали составлять более половины содержания общего азота в речной воде. С чем это связано?

Скорость самоочищения Москва-реки достигла критически низких значений

В связи с ослаблением столичного производства в середине 1990-х годов снизились как гидравлическая, так и гидрохимическая нагрузка на очистные сооружения города (прежде всего уменьшилось поступление азота и органического вещества), и на них активно «стартовал» процесс нитри-

фикации, который был усилен технологическими приемами Мосводоканала. В результате доля нитритов и нитратов резко возросла, а аммонийного азота — снизилась, что, несомненно, было благоприятно для реки, так как на окисление последнего расходуется растворенный кислород и ионы аммония токсичны для гидробионтов.

Вместе с очищенными стоками в реку стали поступать бактерии-нитрификаторы, селекция которых протекала на очистных сооружениях. Бактерии-нитрификаторы сохранили активность в реке, поскольку именно в этот период речная вода перестала быть токсичной по названной выше причине — в связи с ослаблением столичного производства. Процесс нитрификации стал протекать по всему руслу реки, весьма заметно снижая содержание аммонийного азота в ее воде [7, 8].

Взаимосвязанные процессы нитрификации-денитрификации, развивающиеся в реке ниже города по течению, способствуют интегральному улучшению качества воды в Москва-реке, так как денитрификаторы активно разлагают токсичные



Москва-река летом. В кадре — обычные для нашей зоны кувшинки (слева), эйхорния и мусор большого города.

органические вещества, поступающие с диффузными, сельскохозяйственными и промышленными стоками [4].

Резкое возрастание содержания аммонийного азота, а также нитритов в речной воде в последнее время (начиная с 2011 г.) свидетельствует о том, что либо биомасса бактерий-нитрификаторов недостаточна для полной «переработки» поступающего от города аммонийного азота, либо микрофлора подавляется токсичными веществами. Запуск ультрафиолетового обеззараживания сточных вод на КОС и ЛОС — одна из причин снижения активности полезных для реки микробиологических процессов: эта операция убивает бактерии totally, и нитрификаторы, которые вырастают на сооружениях очистки стоков, не попадают в реку. В данном случае необходимое (для трансформации аммонийного азота) количество бактерий должно образоваться в самой реке.

Скорость самоочистки реки в 1998–2012 гг. мы рассчитали по шести главнейшим показателям качества ее воды и результаты представили графически (рис.5). Что же показывает нам этот комплексный «термометр»? Скорость самоочистки реки существенно различается в зависимости от того, по каким показателям мы ее оцениваем: химическому или биохимическому потреблению кислорода, содержанию минеральных форм азота или фосфора. Но во всех случаях она была максимальной до 2006 г., затем значительно снизилась к 2012 г. и стала отрицательной. Иными словами, приблизительно в 2006 г. Москва-река на данном участке русла утратила способность к самоочищению по всем рассмотренным параметрам. Кроме того, в ней стали преобладать процессы загрязнения от донных отложений, что означает утрату способности реки к очищению за счет седиментации взвешенных частиц и развитие процессов вымывания биогенных элементов из

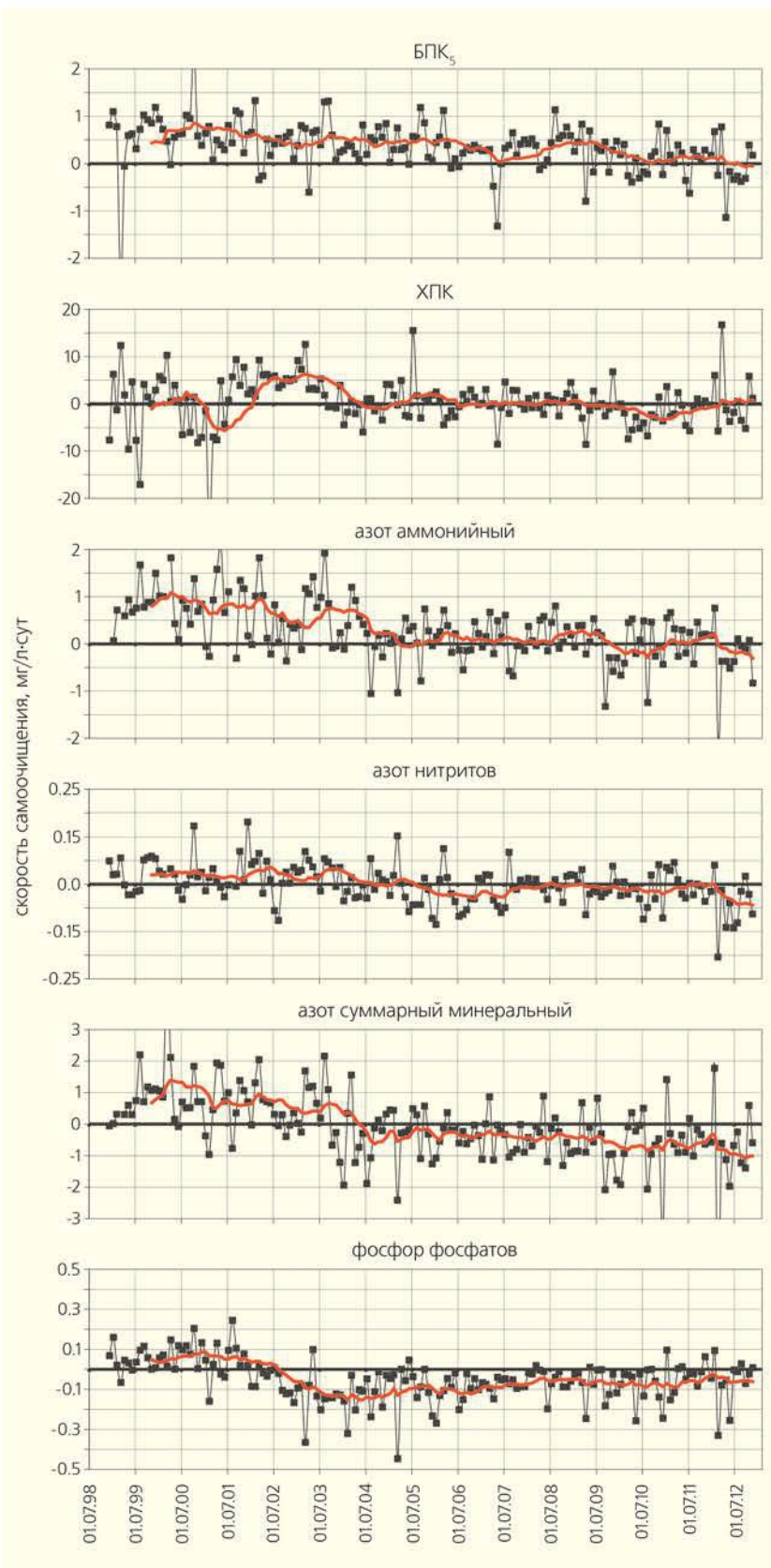


Рис.5. Скорости самоочистки Москва-реки на участке русла от выпуска Курьяновских очистных сооружений до створа «Заозерье».

Таблица

Динамика удельного расхода реки-водоприемника (УРРВ) для Москвы (расчет производился по среднему расходу реки, отнесенному к численности города по официальным данным переписи населения)

Годы	УРРВ*	Изменение УРРВ за год**	Доля неочищенных бытовых стоков в общем речном стоке, %	Характеристика кислородного режима реки в черте города [4]
	л/(чел.·сут)			
до 1740	>12000	нет данных	< 5	естественный, благоприятный
1740–1870	12000–3100	–60	< 10	удовлетворительный
1871–1936	3100–600	–40	30–50	неудовлетворительный в летний период
1937–1964	600–1200	+20	20–30	неудовлетворительный круглый год
1965–1978	1200–1400	+15	снижение до 0	неудовлетворительный в летний период
1979–1996	1400–1300	±5	0	удовлетворительный
1997–2004	1300–950	–35	0	удовлетворительный
2005–2015	950–650	–35	0	неудовлетворительный в летний период (пока редко)

* Крайние значения в течение обозначенного периода

** В течение периода, обозначенного в первом столбце

донных отложений. Это косвенно свидетельствует также о значительном снижении эффективной переработки донного органического вещества бентосным сообществом.

Закономерен вопрос: не превысила ли нагрузка на Москва-реку ее способность к восстановлению? Во многих странах мира активно выбирают стратегию ограничения спонтанного роста городов, если доказано, что проще поселить людей в другом месте, чем строить бесконечные дорогие очистные сооружения, которые все равно не спасают от стоков, поступающих в реки неорганизованно (диффузным путем). Такая практика уже применяется в Индии [9], Иране [10], Китае [11, 12] и странах Европы [13]. Но можно ли количественно оценить воздействие, оказываемое городом на реку, при множестве иных факторов, влияющих на ее экосистему? Одним из показателей урбанистической нагрузки служит удельный расход реки-водоприемника (УРРВ), т.е. расход реки в сутки в удельном выражении на одного жителя города.

Для справки: во всех крупных городах мира, расположенных на реках, этот показатель всегда выше 2000; как правило, расход рек мегаполисов составляет десятки и сотни тысяч литров на жителя в сутки. Москва-река — уникальный случай крайне малого значения УРРВ, и тем тщательнее мы должны выбирать способы сохранения ее благоприятного экологического состояния.

С 1997 г. удельный расход реки-водоприемника в Москве монотонно снижался, причем в 2015 г. приблизился к уровню, зафиксированному в 1930-е годы (табл.). Здесь уместно вспомнить о том, что для обводнения Москва-реки в 1937 г. был введен в эксплуатацию канал имени Москвы (до 1947 г. канал Москва–Волга). В результате этого запуска УРРВ увеличился более чем вдвое, и вот спустя 80 лет вновь достиг критического значения.

«Речка движется и не движется...»

В подобной ситуации закономерен вопрос: можно ли реанимировать экосистему столичной реки? Ответ получается уклончивым: успех восстановительных мероприятий зависит, в частности, от того, сколько времени будет для этого отведено. Потому что Москва-река, увы, не очистится через месяц или год. Но спустя какое-то время оживет, безусловно, если сегодня принять необходимые меры. Для специалистов не секрет, что нужно делать. И это — большая тема, выходящая за рамки настоящей статьи.

Вернемся к тому, с чего начали разговор: нужно ли спасать Москва-реку кардинальными мерами, чтобы ее экосистема восстановилась до уровня 1996–2005 гг., или спокойнее (и дешевле) смириться с тем, что столичная река может быть «чрезвычайно грязной»? В последнем случае всегда под рукой лукавое решение: неуклонно повышать нормативы содержания токсичных веществ. Между тем в глазах огромного большинства россиян и зарубежных гостей река — символ Москвы, ее украшение. А такая ценность требует иного внимания, нежели утилитарный подход к реке-водоприемнику, которую обрекают на утрату экосистемных функций.

В заключение хотелось бы подчеркнуть: стимулом к проведению восстановительных мероприятий может служить повышение капитализации территории бассейна реки от Москвы до Коломны, которое станет возможным, если при формировании стратегии развития региона будут наконец-то учтены экосистемные услуги* [14, 15], получаемые нами от реки. ■

* Экосистемные услуги — многочисленные и разнообразные блага, которые люди бесплатно получают из окружающей среды и правильно функционирующих экосистем. — *Примеч. ред.*

Литература / References

1. Струганов С.Н. Питание Москвы в 1903–1922 гг. по наблюдениям над сточной жидкостью. М., 1923. [Stroganov S.N. Food in Moscow 1903–1922 according to the observations on sewage. Moscow, 1923. (In Russ).]
2. Струганов С.Н. Загрязнение и самоочищение водоемов. М., 1939. [Stroganov S.N. Pollution and self-cleaning of water bodies. Moscow, 1939. (In Russ).]
3. Протокол о борьбе с подкислением, эвтрофикацией и приземным озоном к конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния 1979 года. ООН. 1979. <http://docs.cntd.ru/document/901947573>. [Protocol for the control of acidification, eutrophication and ground-level ozone to the 1979 Convention on long-range transboundary air pollution. UN. 1979. (In Russ).]
4. Щеголькова Н.М., Веницианов Е.В. Охрана загрязненной реки: интенсификация самоочищения и оптимизация водоотведения. М., 2011. [Shchegolkova N.M., Venitsianov E.V. Protection of the polluted river: intensification of self-purification and optimization of water disposal. Moscow, 2011. (In Russ).]
5. Комплексное экологическое обследование реки Москвы и канала им. Москвы в черте г. Москвы (завершающий этап). М., 1996; 1. [Comprehensive environmental survey of the Moscow river and the canal of Moscow within the city of Moscow (final stage). Moscow, 1996; 1. (In Russ).]
6. Kriksunov E.A., Pushkar V.Ya., Lobyrev F.S. et al. Structural-functional organization of biocenoses and the ichthyofauna of the Moskva River in its urban reach. *Water Resources*. Moscow, 2006; 33 (6): 651–660. Doi:10.1134/S0097807806060066.
7. Щеголькова Н.М., Козлов М.Н., Данилович Д.А., Мойжес О.В. Роль московских очистных сооружений в самоочищении р.Москвы по азоту. Экология и промышленность России. М., 2007; 40–43. [Shchegolkova N.M., Kozlov M.N., Danilovich D.A., Moizhes O.V. The role of the Moscow treatment facilities in the self-purification of the river Moscow for nitrogen. *Ecology and industry of Russia*. Moscow, 2007; 40–43. (In Russ).]
8. Щеголькова Н.М., Шапкина П.С. Интенсификация восстановления качества речной воды и роль биологически очищенных вод в самоочищении. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2010; 2: 88–100 [Shchegolkova N.M., Shashkina P.S. Intensification of river water quality restoration and the role of biologically treated water in self-purification. *Water economy of Russia: problems, technologies, management*. 2010; 2: 88–100. (In Russ).]
9. Ramachandra T.V., Bharath A.H., Sowmyashree M.V. Monitoring urbanization and its implications in a mega city from space: spatiotemporal patterns and its indicators. *J. Environ. Manage.* 2015; 148: 67–81. Doi:10.1016/j.jenvman.2014.02.015. Epub 2014 Apr 24.
10. Dadras M., Zulfahidi H., Shafri M. et al. Land Use/Cover Change Detection and Urban Sprawl Analysis in Bandar Abbas City, Iran. *The Scientific World Journal*. 2014. Doi:org/10.1155/2014/690872.
11. Egger P.H., Loumeau G., Püschel N. Natural City Growth in the People's Republic of China. *Asian Development Bank and Asian Development Bank Institute. Asian Development Review*. 2017; 34(2): 51–85. Doi:org/10.1162/adev_a_00095.
12. Lv J., Yang B.D., Yang Y.J. et al. Spatial Patterns of China's Major Cities and Their Evolution Mechanisms during the Past Decades of Reform and Opening Up. *Procedia Engineering*. 2017; 198: 915–925. Doi:org/10.1016/j.proeng.2017.07.137
13. Oueslati W., Alvanides S., Garrod G. Determinants of urban sprawl in European cities. *Urban Stud.* 2015; 52(9): 1594–1614. Doi:10.1177/0042098015577773.
14. Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Услуги наземных экосистем. Е.Н.Букварёва, Д.Г.Замолодчиков (ред.). М., 2016; 1. [Ecosystem services in Russia: a Prototype of the national report. Services of terrestrial ecosystems. E.N.Bukvareva, D.G.Zamolodchikov (eds.). Moscow, 2016; 1. (In Russ).]
15. Розенберг А.Г. Оценка экосистемных услуг для территории Самарской области. Поволжский экологический журнал. 2014; 1: 139–145. [Rosenberg A.G. assessment of ecosystem services for the territory of the Samara region. *Povolzhskiy journal of ecology*. 2014; 1: 139–145. (In Russ).]

The Moskva River Today and Tomorrow

N.M.Shchegolkova^{1,2}, M.A.Kozlova², A.V.Emelyanov², K.N.Shmonin¹

¹Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

²Institute of Water Problems, RAS (Moscow, Russia)

The authors of the article analyze the changes in the water quality of the Moskva River over the last 25 years, using the database of its hydrochemical monitoring for 1971–1981 and 1995–2018. To evaluate the city load on the Moskva River, the rate of self-purification of the river during 1999–2018 and the specific flow intensity of the water intake river in the period from the middle of the XVIII century to our time have been calculated. The authors have shown that the state of the river ecosystem is close to critical; the processes of its self-purification have practically stopped since 2006.

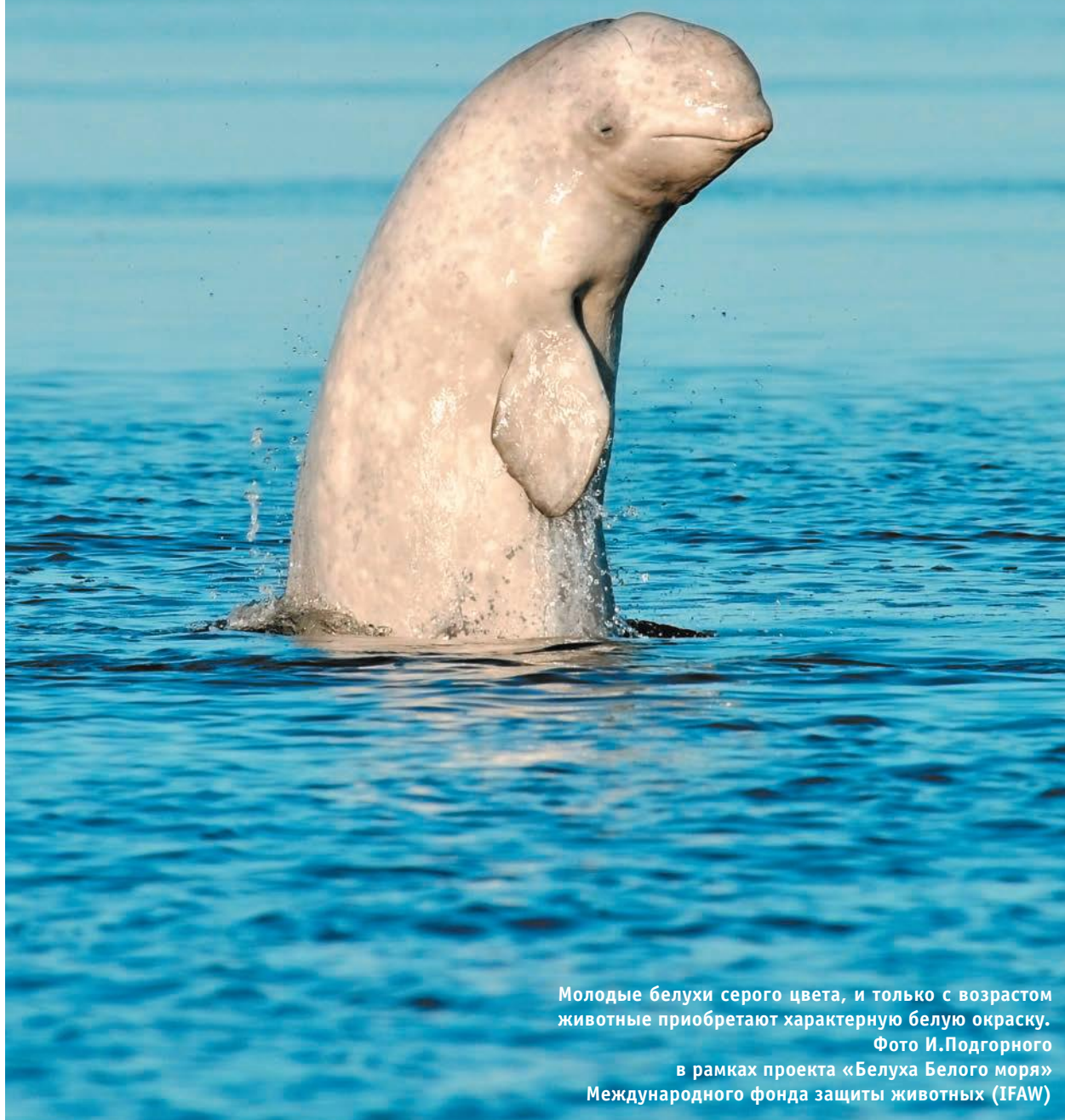
Keywords: urban river, self-purification, hydro-chemical indicators, the ecosystem of the river, sewage treatment plant.

Белуха — «морская канарейка»

Е.М.Панова¹, А.В.Агафонов^{1,2}

Институт океанологии имени П.П.Ширшова РАН (Москва, Россия)

Карадагская научная станция имени Т.И.Вяземского — природный заповедник РАН (Крым, Россия)



Молодые белухи серого цвета, и только с возрастом животные приобретают характерную белую окраску.

Фото И.Подгорного
в рамках проекта «Белуха Белого моря»
Международного фонда защиты животных (IFAW)

Представлен краткий обзор научных данных об акустической коммуникации белух. Рассказано об оригинальных исследованиях вокального поведения этих китообразных в естественной среде и в неволе. Продемонстрировано богатство и разнообразие коммуникативных сигналов белухи, составляющих ее акустический репертуар. Приведены современные данные о контактных опознавательных сигналах у белух. Отмечена выраженная способность этих китообразных к вокальной имитации. Обсуждается вопрос о существовании вокальных диалектов у белух.

Ключевые слова: белуха, контактные сигналы, акустическая коммуникация, вокальное поведение, вокальный репертуар, свисты-автографы, репродуктивные скопления, вокальные диалекты.

Планомерные исследования китообразных в естественной среде начались около 60 лет назад, и все же достоверные данные о численности и миграциях китов и дельфинов, социальной структуре их сообществ, особенностях поведения и подводной акустической сигнализации получены пока для очень ограниченного числа видов. В предыдущих номерах журнала «Природа» мы рассказали об успехах в изучении дельфинов-афалин. Настоящая статья посвящается полярным китам — белухам (*Delphinapterus leucas*), обитающим в арктических и субарктических морях Северной Америки и Евразии.

В летний период белухи формируют в прибрежных акваториях локальные сообщества и, подобно афалинам, доступны для наблюдений с суши. Эти животные чрезвычайно интересны своим вокальным репертуаром: неслучайно их издавна называют морскими канарейками, а в русском языке укоренилось выражение «реветь белугой» (спешим снять незаслуженные подозрения с одноименной рыбы).

Зарождение биоакустики и первое знакомство с сигналами белухи

Белухи оказались первыми китообразными, чьи звуки были записаны в естественной среде: в 1949 г. американским зоологом Б.Лоуренс и У.Шевиллу повезло обнаружить скопление полярных китов, населяющих свободную от прочих источников подводных шумов акваторию в нижнем течении р.Сагней в Канаде [1]. Развитие морской биоакустики тогда только начиналось. В СССР первые исследования белухи стали проводиться с 1978 г. на Белом море, в районе Летнего берега Онежского залива, сотрудниками Института океанологии имени П.П.Ширшова под руководством В.М.Бель-



Елена Михайловна Панова, научный сотрудник лаборатории морских млекопитающих Института океанологии имени П.П.Ширшова РАН. Занимается изучением поведения и акустической коммуникации китообразных.
e-mail: baralginsp@yandex.ru



Александр Владиславович Агафонов, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории морских млекопитающих Института океанологии имени П.П.Ширшова РАН и Карадагской научной станции имени Т.И.Вяземского — природного заповедника РАН. Область научных интересов — происхождение и развитие знаковых систем, акустическая система коммуникации дельфинов.
e-mail: agafonov.57@mail.ru

ковича [2]. Основные наблюдения тогда вели со стационарных наблюдательных пунктов с параллельной аудиозаписью подводной акустической сигнализации белух. В 1980-е годы район работ значительно расширился. Были организованы экспедиции в Амурском лимане, на Камчатке и на Чукотке. Всего же за последние 30 лет ученые разных стран зафиксировали акустические сигналы белух в самых разных районах ее ареала: у берегов Шпицбергена и на Аляске, в Гудзоновом заливе и в эстуарии р.Святого Лаврентия (провинция Квебек, Канада), на Европейском Севере России и на Дальнем Востоке.

Для авторов Белое море было и остается основным районом исследований. Благодаря проведенным в 1980–1990-е годы авианаблюдениям и изучению акватории при помощи яхт здесь были выделены места так называемых репродуктивных скоплений белух — районы, где в весенне-летний период живут самки с детенышами. Так, более 20 лет проводятся наблюдения в облюбованной китами акватории Соловецких о-вов [3]. А в последние годы собраны данные и о других скоплениях Онежского и Двинского заливов.

Вокалисты-импровизаторы, или биоакустический ребус

Любые исследования вокального поведения животных начинаются с описания производимых ими сигналов с последующим анализом и типологизацией. И вот тут исследователям белух пришлось помучиться! Напомним, что до недавнего времени спектральный анализ звука не использовался так широко, как сегодня, в эпоху компьютеров. Ученым приходилось характеризовать зарегистрированные сигналы «на слух», ассоциируя их со знакомыми звуками. Сигнализация белух действительно весьма богата и разнообразна; исследователи выделяли несколько десятков вариаций, называя их порой весьма экзотично — «крик мартышки» или «урчание кота». Привязать определенные типы звуков к поведенческим ситуациям оказалось не легче. Можно было обозначить лишь общие закономерности продуцирования сигналов в определенном контексте. Например, повышенная акустическая активность обычно сопровождала социальные взаимодействия белух, а будучи встревоженными, животные, наоборот, затихали. Однако выделить однозначные корреляции не удавалось, что неудивительно: существенная часть жизни белух скрыта от наблюдателя.

За прошедшее время техническая вооруженность исследователей существенно возросла. Появились цифровые фотоаппараты, значительно улучшившие возможности фотоидентификации

животных, беспилотные летательные аппараты для наблюдений с воздуха, подводные видеокамеры и многое другое. Колоссальный прогресс наступил и в области регистрации и анализа акустических сигналов: теперь их можно видеть на экране компьютера, измерять и сравнивать между собой. На смену характеристике звуков по слуховым ассоциациям пришел визуальный анализ: исследователи описывают их по картинке-спектрограмме.

Но прежде чем охарактеризовать вокальный репертуар белухи, стоит вкратце напомнить, что представляют собой сигналы зубатых китов. Традиционно они подразделяются на две крупные категории: свисты, или тональные сигналы, и импульсные звуки. Первые — непрерывные узкополосные сигналы, вторые — последовательности отдельных щелчков, иногда следующих со столь высокой частотой, что человек воспринимает их как непрерывный звук, напоминающий те самые «крики» и «урчания». Далее сигналы делят на типы. Свисты, например, можно классифицировать, основываясь на форме их частотного контура, видимой на спектрограмме, а импульсные сигналы — по характеру следования импульсов в них.

Казалось бы, визуальный анализ должен облегчить задачу систематизации звуков, однако «на вид» сигналы белухи оказались так же сложны для восприятия человеком, как и «на слух». Одни сигналы вписывались в общепринятую схему (рис.1), классификация других вызывала затруднения. Так, иногда было сложно провести границу даже между

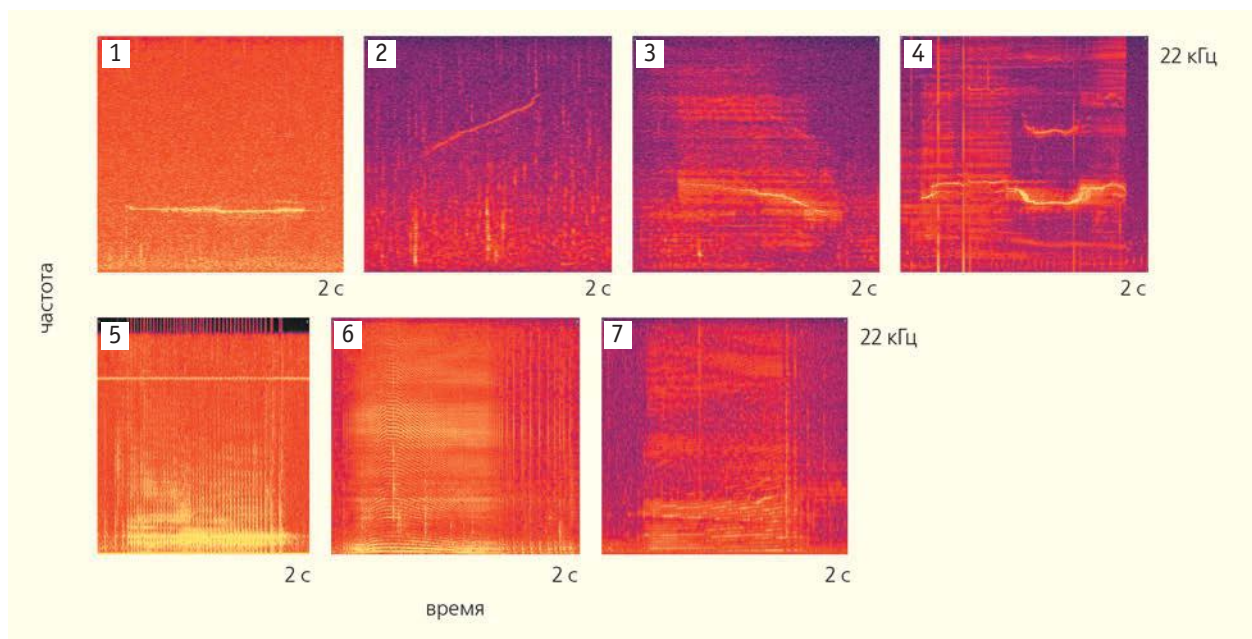


Рис.1. Некоторые примеры акустических сигналов белухи. Верхний ряд: тональные сигналы с различной формой частотного контура. 1 — «уплощенный»; 2 — «восходящий»; 3 — «нисходящий»; 4 — «волнообразный». Нижний ряд: импульсные сигналы с различной частотой следования импульсов. 5 — серия отдельных импульсов, следующих с частотой около 45 имп./с; 6, 7 — импульсные сигналы с максимальной частотой следования импульсов около 350–400 имп./с, имеющие вид непрерывных.



Сегодня белуха — обычный обитатель дельфинариев и океанариумов.

Фото Е.Пановой

импульсными и тональными категориями, поскольку обнаружилось множество переходных типов. Например, звук, начинавшийся как свист, заканчивался серией импульсов; или сигналы, которые по частотным характеристикам должны были быть отнесены к свистам, имели скрипучую окраску, свойственную импульсным звукам. Сигналы могли переходить в шум, полностью скрывавший их структуру. И наконец, все эти разнообразные звуки белуха способна продуцировать одновременно, создавая единый сигнал, состоящий из двух, а то и трех независимых компонентов.

Описанные особенности белушых сигналов приводили к тому, что каждый исследователь предлагал свою схему их классификации, которая обычно отличалась крайней субъективностью и была мало сопоставима с предшествовавшими работами коллег. Ученые достигли согласия лишь в одном: они характеризовали систему акустических сигналов белухи как «высокоградусную», имеющую размытые границы между типами и большую вариативность внутри каждого из них [3].

«Автограф» полярного кита

Существенный прорыв в понимании акустической коммуникации белух произошел благодаря исследованиям этого вида в неволе — в дельфи-

нариях и океанариумах. В Ванкуверском аквариуме (Vancouver Aquarium) канадская исследовательница В.Вергара и ее коллеги наблюдали за белухой с самого рождения в течение первых трех лет ее жизни [4]. Оказалось, что детеныш не рождается с готовым набором звуков, а овладевает им постепенно. Так, первое время новорожденный издавал только импульсные сигналы, через две недели появились свисты, а в возрасте четырех месяцев он начал производить эти сигналы одновременно. По мере взросления белушонка его репертуар существенно расширился, пополнившись разнообразными звуками, свойственными взрослым животным.

Кроме того, ученые обнаружили, что новоиспеченная мать издает один и тот же узнаваемый сигнал — серию импульсов, иногда дополняя его свистом. В первые два часа после рождения детеныша самка полярного кита повторяла эти звуки особенно часто (несколько раз в минуту); в дальнейшем они были ассоциированы со стрессовыми ситуациями — изоляцией отдельных особей белух, проведением ветеринарных процедур, присутствием дайверов в бассейне [4]. Специфический контекст использования сигналов позволил предположить, что они служат для поддержания акустического контакта китов друг с другом. Аналогичная форма взаимодействия была обнаружена в 1960-е годы у дельфинов-афалин, и сигналы, выполняющие

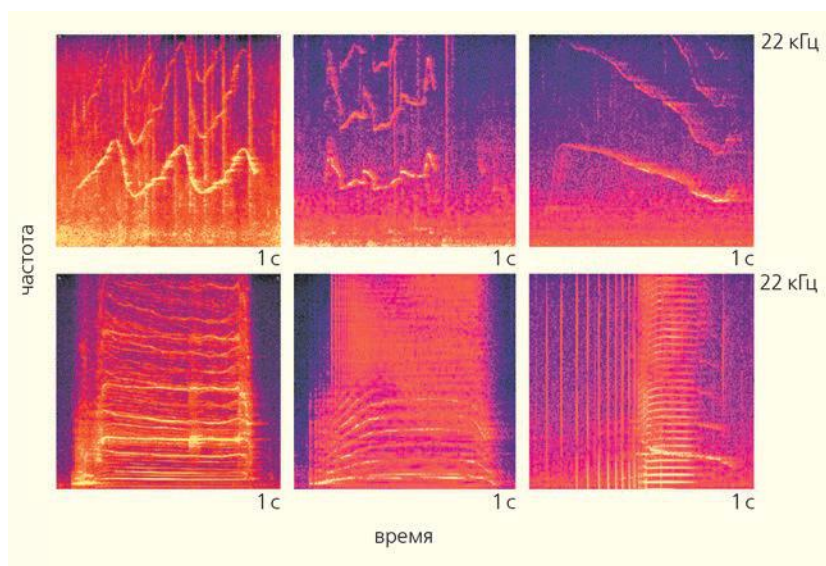


Рис.2. Свисты-автографы трех афалин (вверху) и контактные сигналы трех белух.

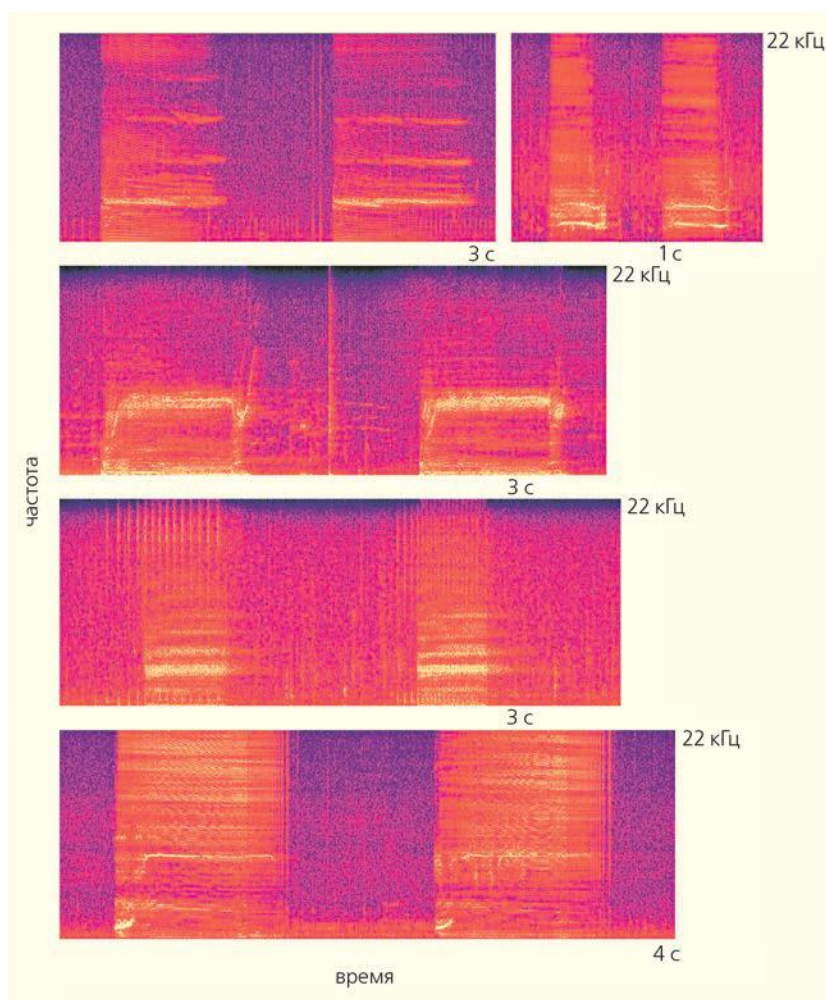


Рис.3. Примеры предполагаемых контактных сигналов белух, записанные в естественной среде. Все сигналы отличаются высокой стереотипностью и представлены комбинацией широкополосной импульсной серии и узкополосного свиста.

такую функцию, получили название «свисты-автографы» [5]. Свист-автограф дельфина уникален, обладает индивидуально-специфичной формой частотного контура. Такие сигналы служат для индивидуального опознавания особей и обеспечивают сплоченность группы. Особенно активно дельфины издают эти свисты, оказавшись в изоляции от сородичей или в состоянии стресса. Неслучайно еще до появления гипотезы о свистах-автографах они были описаны как сигналы бедствия.

Однако если у афалин роль контактных сигналов выполняют свисты, то у белух такие звуки имеют иную физическую природу: это импульсные серии или, как вариант, бифонические сигналы, имеющие в дополнение к импульсной серии еще и тональный компонент (рис.2) [4, 6, 7]. (Интересно, что настолько же сложную структуру имеют и предполагаемые контактные сигналы нарвалов (*Monodon monoceros*) — ближайших родственников белух). Выявлено и еще одно важное различие. Дело в том, что афалины постоянно производят свои автографы — их число может достигать 80–90% всех сигналов, издаваемых дельфинами в обычных ситуациях [8]. У белух же на долю контактных сигналов приходится лишь около 4% звуков [4] — видимо, отчасти по этой причине данная категория сигналов долго оставалась незамеченной.

После того как стало понятно, что представляют собой сигналы-автографы белухи, мы с интересом вернулись к записям, собранным в природе. Оказалось, что подобные звуки в репертуаре диких белух присутствуют во множестве (рис.3); они отличаются большим разнообразием и в большинстве своем специфичны для каждого из районов, где проводились работы. В дальнейших исследованиях предстоит выяснить, как эти сигналы используются животными в естественной среде.

Есть ли у белух «диалекты»?

Белухи распространены в природе весьма широко, поэтому закономерен вопрос: различаются ли их акустические сигналы в пределах ареала? Исследователи сходятся во мнении, что репертуары свистов всех изученных в данный момент популяций очень схожи [3]. Для белух характерны сигналы с простой формой частотного контура (т.е. слабо выраженной частотной модуляцией), однако диапазон частот может варьироваться в разных районах. Например, полярные киты, населяющие эстуарий р.Святого Лаврентия, издают более высокочастотные звуки, чем их сородичи из залива Каннингхем (Нунавут, Канада). Полагают, что это может быть связано с адаптацией к акустическим особенностям среды, в частности к большему уровню фонового шума в эстуарии.

Влияние внешних факторов на структуру сигналов хорошо известно: еще в начале XX в. французский врач-отоларинголог Э.Ломбард заметил, что в условиях повышенного шума человек начинает говорить громче; позже было показано, что изменяются и некоторые другие параметры голоса. Сходные эффекты обнаружены и у животных: например, птицы в городе поют громче и на более высоких частотах. Из-за активного освоения человеком Мирового океана проблема акустического загрязнения среды возникла и у китообразных. Считают, что для того, чтобы быть услышанными среди шума от проходящих судов, они вынуждены смешать частоту своих звуков или производить более громкие и продолжительные сигналы с усложненной формой частотного контура. Подобные модификации сигналов описаны у белухи; предполагается, что они есть и у некоторых других видов зубатых китов.

Однако не только акустическая адаптация способна привести к внутривидовой изменчивости звуков. Могут влиять и случайные факторы: например, сигналы разных популяций начинают различаться из-за накопления ошибок в ходе их передачи из поколения в поколение. В этом случае изменчивость сигналов — побочный продукт эволюции и не несет какой-либо функциональной нагрузки. Наконец, дивергенции сигналов могут способствовать социальные факторы: если одно пространство (территория или акватория) занято несколькими социальными группами, для их членов становится важным обозначить свою принадлежность к одной из них. Среди морских млекопитающих ярко выраженную межгрупповую изменчивость звуков демонстрируют рыбацкие косатки. Эти киты имеют специфические наборы звуков — так называемые вокальные диалекты, которые могут служить как для поддержания контакта между родственниками, так и для различения «своих» и «чужих» [9]. Полагают также, что вокальные диалекты играют роль при выборе полового партнера: предпочтение отдается особи с максимально

непохожим диалектом, что помогает избежать близкородственного скрещивания.

Предмет наших исследований — вокальные диалекты белух и географическая изменчивость их сигналов в целом. Для детального изучения вопроса мы выбрали тип звуков, обнаруженный в репертуарах полярных китов в разных районах. Оказалось, что эти сигналы различаются по своим частотным характеристикам не только у популяций, удаленных друг от друга на тысячи километров, но и в пределах существенно меньшего пространства — у животных, населяющих соседние заливы Белого моря [10]. В последнем случае расстояния по белушью меркам совсем небольшие (около 60–280 км), и обитатели разных заливов, возможно, контактируют между собой. Пока сложно судить, являются ли обнаруженные нами расхождения в сигналах аналогом вокальных диалектов косаток. Дальнейшее изучение феномена требует как расширения географии работ, так и привлечения данных о популяционной и социальной структуре белухи.

Не только «канарейки», но и «попугаи»

Как уже упоминалось выше, детеныш белухи узнает сигналы, свойственные его виду, от матери и других окружающих его особей. Таким образом, можно говорить о том, что видоспецифичная сигнализация, по крайней мере отчасти, приобретает путем «культурного наследования». Для китообразных это вовсе не исключение, а скорее правило: традиции играют значимую роль в их социальной жизни, помогая осваивать звуки, характерные для вида, а также формируя другие поведенческие особенности и умения (охотничьи приемы, пищевые предпочтения, манипуляции с предметами т.д.) [11].

Белухи способны выучивать акустические сигналы не только своего вида. Не совсем ясно, зачем, но они копируют и многие другие звуки. Например, периодически появляются сообщения о том, что белуха имитировала человеческие слова, причём однажды настолько точно, что вызвала замешательство у персонала океанариума. Другие белухи ввели в заблуждение дельфина, скопировав генерированные компьютером сигналы, которые транслировались под воду в ходе эксперимента. Не остались без их внимания и звуки птиц, которые в виде аудиозаписи проигрывались рядом с бассейном, — белухи научилась воспроизводить и их.

Самим авторам удалось поучаствовать в следующем естественном эксперименте [12]. В дельфинарий, где мы в течение ряда лет изучали поведение и акустическую сигнализацию содержащихся там афалин, подселили нового обитателя — белуху. В первые же минуты появления она, как и ожидалось, начала издавать свои контактные сигналы, а также другие типично белушьи звуки. Белуха и афалины пребывали в одном бассейне (т.е. в еди-

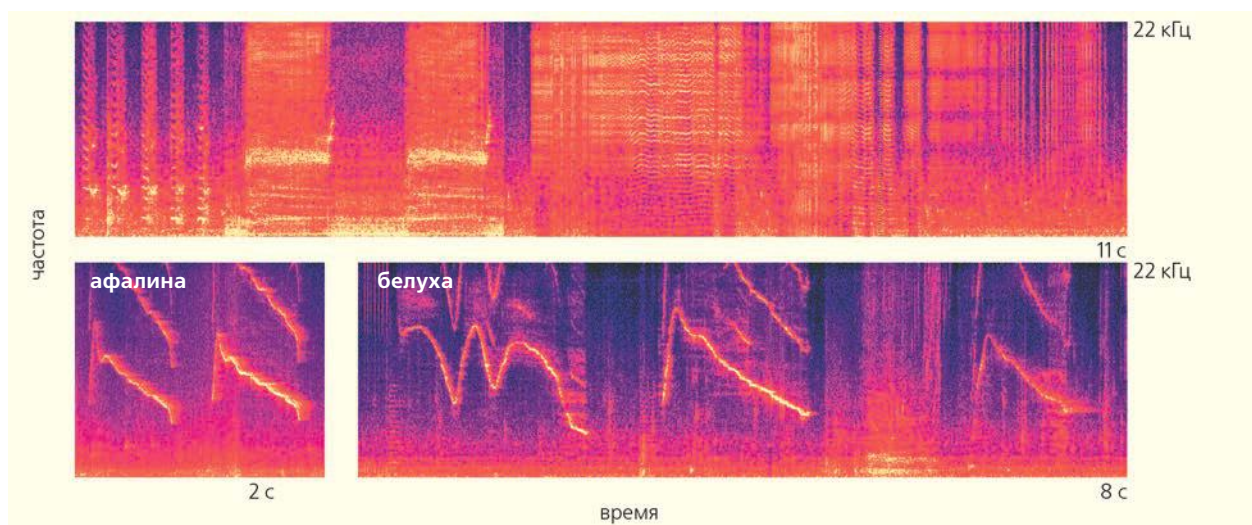


Рис.4. Вверху: типичные сигналы белухи, записанные в первые дни ее пребывания в новом дельфинарии. Внизу слева — свисты-автографы афалины, справа — их имитации белухой, записанные спустя два месяца после ее появления.

ном акустическом пространстве), поэтому для точной идентификации сигналов белухи требовалось отсаживать ее в соседний. Такая возможность появилась лишь спустя два месяца после ее появления в дельфинарии. Проанализировав полученные аудиозаписи, мы обнаружили, что, хотя сигнализация белухи в целом осталась характерной для вида, ее репертуар пополнился новыми звуками. Некоторые из них были очень похожи на свисты-автографы содержащихся с белухой афалин (рис.4). Эти сигналы-имитации регистрировались в записи регулярно: их доля составляла почти 5% вокализаций белухи. При этом обратный случай, т.е. копирование афалинами сигналов белухи, был отмечен только однажды. Следует сказать, что имитация афалинами «чужих» свистов-автографов — известное явление; оно получило название «мимикрия». Существует гипотеза, что такое поведение дельфинов — проявление дружелюбия и может служить своеобразным обращением к владельцу автографа. Наши подопытные дельфины также постоянно имитировали сигналы друг друга, причем эта мимикрия носила иерархический характер: более высокие по рангу особи могли издавать «автографы» более низкоранговых, но не наоборот. В целом же конвергенция сигналов, сопровождающая формирование и укрепление социальных связей, описана для многих вокально активных видов, от птиц до человека [13]. По-видимому, и белуха, попав в непривычное для нее окружение, была вынуждена приспособить свою акустическую сигнализацию к новым социальным партнерам, причем сделала это в достаточно короткий срок. Последнее, впрочем, совсем неудивительно: японские ученые экспериментально показали, что белуха способна скопировать предъявленный сигнал с первого раза [14]. Конечно, способностью к вокальной имитации могут похвастаться не только белухи, но и дру-

гие китообразные, например афалины и косатки. А вот среди остальных млекопитающих это умение — большая редкость: помимо человека, к этому способны только такие далекие друг от друга животные, как слоны и настоящие тюлени.

Известно, что у человека обучение легче протекает в молодом возрасте, а для освоения речи вообще существует определенный критический период. Однако выдающимися способностями вокальной имитации обладают именно взрослые люди, особенно те, кто профессионально занимается развитием этого навыка — пародисты, актеры, певцы. Оказывается, что и китообразные могут обучаться новым звукам, даже будучи в зрелом возрасте. В связи с этим американские исследователи предложили интересную гипотезу, предполагающую, что развитая способность к вокальной имитации может быть необходима животному для успешной локализации источника сигналов, а также для отслеживания и предсказания действий соратников [15]. Не вызывает сомнений, что для китообразных, обитающих в трехмерной, визуально ограниченной среде, этот навык особенно важен.

* * *

В наших знаниях об акустической коммуникации белух остается еще очень много белых пятен. По-прежнему неясна роль большинства типов их сигналов, даже встречающихся наиболее часто; малопонятны и причины столь большого разнообразия звуков, производимых полярным китом. Однако с уверенностью можно сказать, что это — настоящий виртуоз, мастерски владеющий искусством воспроизведения звука. Белуха не только осваивает сложные видоспецифичные сигналы, обучаясь им у родственников, но и постоянно адаптирует их к особенностям условий окружающей среды или социума. ■

Работа выполнена в рамках государственных заданий ФАНО России (№0149-2018-0008 и №007-00082-18-00).

Литература / References

1. *Schevill W.E., Lawrence B.* A phonograph record of the underwater calls of *Delphinapterus leucas*. Massachusetts, 1950.
2. *Белькович В.М., Щекотов М.Н.* Белуха. Поведение и биоакустика в природе. М., 1990. [*Bel'kovich V.M., Shchekotov M.N.* The belukha whale: Natural behaviour and bioacoustics. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, 1993.]
3. *Беликов Р.А., Белькович В.М.* Акустический репертуар беломорских белух (*Delphinapterus leucas* Pall.) соловецкого стада в репродуктивном скоплении. Фундаментальные исследования океанов и морей. Н.П.Лаверов (ред.). М., 2006. [*Belikov R.A., Belkovich V.M.* Acoustic repertoire of the White sea beluga whales (*Delphinapterus leucas* Pall.) herd in the Solovetsky reproductive gathering. Basic researches of the oceans and seas. N.P.Laverov (ed.). Moscow, 2006. (In Russ).]
4. *Vergara V.* Acoustic communication and vocal learning in belugas (*Delphinapterus leucas*). PhD Thesis. The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2011.
5. *Caldwell M.C., Caldwell D.K., Tyack P.L.* Review of the signature-whistle hypothesis for the atlantic bottlenose dolphin. *The Bottlenose Dolphin*. S.Leatherwood, R.R.Reeves (eds). San Diego, 1990.
6. *Morisaka T., Yoshida Y., Akune Y. et al.* Exchange of «signature» calls in captive belugas (*Delphinapterus leucas*). *Journal of Ethology*. 2013; 31: 141–149. Doi:10.1007/s10164-013-0358-0.
7. *Panova E., Agafonov A., Belikov R., Melnikova F.* Vocalizations of captive beluga whales, *Delphinapterus leucas*: Additional evidence for contact signature «mixed» calls in belugas. *Marine Mammal Science*. 2017; 33(3): 889–903. Doi:10.1111/mms.12393.
8. *Агафонов А.В., Панова Е.М., Логоминова И.В.* Типология тональных сигналов афалин (*Tursiops truncatus*). М., 2016. [*Agafonov A.V., Panova E.M., Logominova I.V.* The typology of tonal signals of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). Moscow, 2016. (In Russ).]
9. *Ford J.K.B.* Vocal traditions among resident killer whales (*Orcinus orca*) in coastal waters of British Columbia. *Canadian Journal of Zoology*. 1991; 69: 1454–1483. Doi:10.1139/z91-206.
10. *Panova E.M., Belikov R.A., Agafonov A.V. et al.* Intraspecific variability in the “vowel”-like sounds of beluga whales (*Delphinapterus leucas*): Intra- and interpopulation comparisons. *Marine Mammal Science*. 2016; 32(2): 452–465. Doi:10.1111/mms.12266.
11. *Rendell L., Whitehead H.* Culture in whales and dolphins. *Behavioral and Brain Sciences*. 2001; 24: 309–382.
12. *Panova E.M., Agafonov A.V.* A beluga whale socialized with bottlenose dolphins imitates their whistles. *Animal Cognition*. 2017; 20(6): 1153–1160. Doi:10.1007/s10071-017-1132-4.
13. *Tyack P.L.* Convergence of calls as animals form social bonds, active compensation for noisy communication channels, and the evolution of vocal learning in mammals. *Journal of Comparative Psychology*. 2008; 122(3): 319–331. Doi:10.1037/a0013087.
14. *Murayama T., Iijima S., Katsumata H., Arai K.* Vocal imitation of human speech, synthetic sounds and beluga sounds, by a beluga (*Delphinapterus leucas*). *International Journal of Comparative Psychology*. 2014; 27(3): 369–384. Doi:10.5811/westjem.2011.5.6700.
15. *Mercado III E., Mantell J.T., Pfordresher P.Q.* Imitating sounds: A cognitive approach to understanding vocal imitation. *Comparative Cognition & Behavior Reviews*. 2014; 9:17–74. Doi:10.3819/ccbr.2014.90002.

Beluga Whale — a Marine Warbler

E.M.Panova¹, A.V.Agafonov^{1,2}

¹*Shirshov Institute of Oceanology, RAS (Moscow, Russia)*

²*Vyazemsky Karadag Scientific Station — Nature Reserve of the RAS (Crimea, Russia)*

A brief review of scientific ideas about the acoustic communication of beluga whales is presented. The original studies of vocal behavior of these cetaceans in the natural environment and in captivity are described. The richness and diversity of the communicative signals of the beluga, which constitute its acoustic repertoire, are demonstrated. Modern data on contact recognition calls of belugas are provided. Pronounced ability of these cetaceans to vocal imitation was noted. The question of the existence of vocal dialects among belugas is discussed.

Keywords: beluga whale, contact calls, acoustic communication, vocal behavior, vocal repertoire, signature whistles, reproductive gatherings, vocal dialects.

Мышление птиц: понимают ли попугаи, о чем они говорят?

З.А.Зорина¹, А.А.Смирнова¹, Т.А.Обозова¹

¹Биологический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

Рассмотрены результаты многолетних исследований мышления попугаев, проведенных американским психологом А.Пепперберг, которая показала, что эти птицы по своим когнитивным способностям сопоставимы с человекообразными обезьянами. Данные А.Пепперберг совпадают с результатами, полученными авторами статьи при изучении врановых птиц. Описан уникальный эксперимент по обучению речи африканского попугая жакко Алекса, усвоившего не только названия предметов и действий, но также ряд понятий (больше / меньше, сходство / отличие). Продемонстрирована способность Алекса самостоятельно расширять лексикон за счет подражания людям. Отмечена способность попугая тонко оценивать и самостоятельно «называть» эмоциональное состояние окружающих (беспокойство, раздражение, усталость).

Ключевые слова: мышление птиц, говорящие попугаи, происхождение речи.

Истории о попугаях, которые «понимают, о чем говорят», занимают особое место в ряду свидетельств удивительных способностей животных. Этой теме посвящена обширная литература [1], однако, как показывает ее анализ, чаще всего речь идет о механическом повторении заученных фраз, некоем словесном потоке, совершенно не связанном с конкретной ситуацией. В ряде случаев у наблюдателя может создаться иллюзия осмысленного поведения (например, попугай здоровается или прощается в соответствии с ситуацией), но при более внимательном анализе оказывается, что хозяин принимал желаемое за действительное. И все же постепенно накапливались факты, заслуживающие серьезного внимания: высказывания некоторых говорящих попугаев действительно приходились точно «к месту», птицы произносили совершенно новые слова и целые фразы, соответствовавшие контексту. При этом их поведение не могло быть результатом случайного совпадения или простого повторения «пройденного», поскольку сложившиеся обстоятельства не отмечались ранее. Сообщения о подобных эпизодах появляются не часто, но регулярно, однако, поскольку они единичны, проверить их нельзя.

Вот, например, одна примечательная история. Как известно, многие (хотя и не все) птицы не разговаривают при посторонних. Поэтому продемонстрировать красноречие попугая в нужный для хозяина момент — дело сложное и не всегда благодарное. С такой трудностью столкнулась не-

кая съёмочная группа: операторы провели целый день в квартире владельца говорящих птиц, которые за все время не проронили ни слова. Когда начали собирать аппаратуру, кто-то из раздосадованных гостей споткнулся о кабель. Тут же раздался дружный птичий хохот, а один из попугаев прокричал: «Ага, запутался!» Тут уж никакой предварительной дрессировки и в помине не было — птица совершенно явно сама сообразила, что сказать в этой необычной коллизии. Можно привести и другие примеры, свидетельствующие о том, что во многих случаях (хотя далеко не во всех) высказывания попугаев бывают осмысленными — они находят и произносят именно те слова, которые уместны в только что возникшей ситуации. А подобное поведение принято расценивать как проявление разума животных, пусть и элементарного.

Убедительный ответ на вопрос, «понимают ли попугаи, о чем говорят», имеет принципиальное, а отнюдь не частное значение, поскольку он напрямую связан с одной из важнейших задач современной когнитивной науки — исследованием эволюционных предпосылок мышления человека. Класс птиц развивался в процессе эволюции особым путем, параллельно с млекопитающими и совершенно независимо от них, тем не менее установлено, что зачатки мышления имеются и у его представителей [2, 3]. Высшие представители класса птиц могут изготавливать и использовать орудия [4, 5], они проявляют элементы абстрактного мышления (формирование довербальных понятий и умозаключений) [6–9]. Наконец, врановые проявили способность к символиза-



Зоя Александровна Зорина, доктор биологических наук, заведующая лабораторией физиологии и генетики поведения кафедры высшей нервной деятельности биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Научные интересы — элементарное мышление животных, в том числе способность к обобщению и символизации у врановых птиц.
e-mail: zorina_z.a@mail.ru



Анна Анатольевна Смирнова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник той же лаборатории. Научные интересы — высшие когнитивные функции животных как эволюционные предпосылки мышления человека.



Татьяна Анатольевна Обозова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник той же лаборатории. Область научных интересов — элементарное мышление животных, поведение птиц в природе.

ции — операции, которая лежит в основе языка человека [13]. Весь спектр их когнитивных способностей близок к описанному у человекообразных обезьян [11].

Высказывания, которые кажутся осмысленными, принадлежат, как правило, крупным попугаям, главным образом серому африканскому, или жако (*Psittacus erithacus*). И именно благодаря представителю этого вида, попугаю Алексу, был получен убедительный (и притом положительный) ответ на тот самый вопрос. Это произошло благодаря без преувеличения героическому исследованию, которое американский психолог Айрин Пепперберг проводила на протяжении 30 лет (1978–2007) и продолжает в настоящее время.

Уникальные исследования когнитивных способностей жако

Результаты опытов Пепперберг описаны в двух книгах. Первая, «The Alex Studies: Cognitive and Communicative Abilities of Grey Parrots» [12], — строго

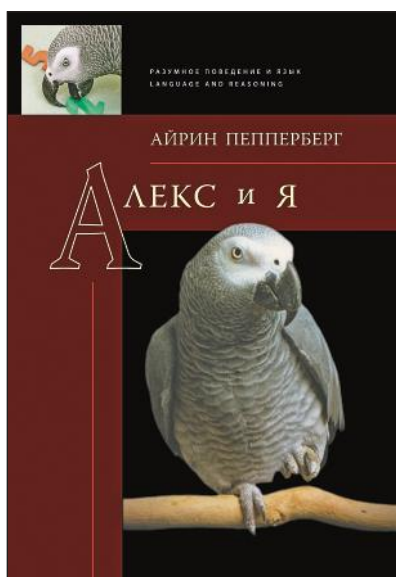
научная монография, в которой обобщены результаты многолетних экспериментов, доказавших, что попугаи обладают высоким уровнем развития мышления, способны к формированию понятий и к символизации, т.е. установлению эквивалентности между неким знаком (в том числе словом) и референтом — предметом, действием, понятием и т.д. Способность к такой операции лежит в основе усвоения речи ребенком, а ее доступность попугаю свидетельствует, что эти птицы действительно могут говорить осмысленно.

Кратко упомянем, что в результате кропотливых тренировок Алекс усвоил названия десятков предметов, а также слова, обозначающие категории и относящиеся к ним определения. Например, категория «цвет» включает названия семи цветов, категория «форма» — пяти разных форм, категория «материал» — наименования трех материалов и т.д. Алекс овладел всеми доступными животным приемами количественных оценок (условно это можно назвать зачатками способности к счету). Он запомнил числительные от 1 до 7, применял их к множествам разной природы, у него сфор-

мировалось понятие «больше/ меньше», что позволяло ему сравнивать не только множества реальных предметов, но и цифры.

При предъявлении ему наборов мелких предметов разного цвета, формы, размера Алекс мог правильно отвечать на следующие вопросы: «Сколько зеленых (синих или красных) предметов?»; «Предметов какого цвета больше?»; «Какая цифра больше?» и т.д. Если ему показывали два однотипных, но по-разному окрашенных и разного размера предмета (например, ключи — его любимые игрушки), — и спрашивали, что в них различается, он безошибочно определял: «цвет, размер»; на вопрос «что одинаковое?» следовал ответ: «форма».

Алекс правильно употреблял слова «одинаковый» и «разный» при первом же сопоставлении множества предметов и ситуаций. Это позволяет говорить о том, что в ходе экспериментов он усвоил понятия «сходство» и «различие», на оперировании которыми основаны и некоторые другие формы абстрактного мышления (в частности, использование аналогий). По нашим данным, попу-



Монография американского психолога А.Пепперберг «Алекс и я» (М.: Языки славянских культур, 2017) — первая книга на русском языке, целиком посвященная мышлению птиц. В центре повествования — работа автора с жако Алексом.

гаям, как и врановым, доступно даже выявление аналогий в структуре сложных стимулов [8, 9].

Несомненная заслуга Пепперберг состоит в том, что она первой смогла показать: спектр когнитивных способностей попугаев — существ, столь далеких от приматов, — включает развитую способность к символизации. Ее опыты убедительно продемонстрировали: жако не просто воспроизводит человеческие слова, но и понимает их смысл. Возможности попугаев в усвоении и использовании символов оказались схожими с обнаруженными у шимпанзе, которых обучили простым аналогам языка человека. Эти данные Пепперберг совпадают с материалами, полученными нами при изучении других высокоорганизованных птиц — врановых [7, 11, 13].

Итак, за 30 лет работы Пепперберг не только получила уникальные данные о психике попугаев, находящие все новые подтверждения в современной литературе, но и способствовала постепенному радикальному пересмотру общих представлений о когнитивных способностях птиц. В своей научной монографии она представила результаты, полученные в рамках строгих экспериментов, на большом статистическом материале, но среди них было немало фактов, которые не вписывались в формальные рамки. Чем дальше Пепперберг углублялась в работу и общение с Алексом, тем больше убеждалась: птица не просто правильно произносит слова и осознает, какие предметы и действия они обозначают, но может понять, что некоторые слова выражают еще и человеческие желания, настроения, эмоции. Оказалось, что, помимо усвоения символов, в процессе специальных тренировок Алекс следил за разговорами окружающих, по собственной инициативе запоминал (а потом

к месту употреблял) слова, которые никто не ожидал от него услышать, и они могли выражать также его собственные желания, настроения и эмоции.

Именно этой части полученных результатов посвящена вторая, научно-популярная, книга Пепперберг «Alex and me», написанная в 2008 г. Она удачно переведена на русский язык и опубликована издательством «Языки славянских культур» в 2017 г. [14]. Ответ на вопрос, «понимают ли попугаи, о чем они говорят», проиллюстрирован описанием некоторых особенностей поведения Алекса в процессе формальных экспериментов, в которых ярко проявились его сообразительность, умение наблюдать за окружающими его людьми, а также за другими птицами, обучаемыми речи, оценивать их поведение, эмоциональное состояние и делать из этого свои выводы.

Причины заниженных ожиданий в отношении интеллекта птиц

Большое место в монографии «Alex and me» уделено доказательствам высокого интеллектуального уровня попугаев, что особенно ценно для отечественного читателя. Действительно, это практически первая книга на русском языке, целиком посвященная мышлению птиц. Парадокс состоит в том, что проблема мышления животных вообще [15–17], и птиц в частности, активно разрабатывается в нашей стране на протяжении целого столетия. Фундаментальные исследования Л.В.Крушинского [2] и его научной школы, посвященные врановым птицам, начались в 1950-е годы и продолжаются до настоящего времени [6–11, 13], намного опередив соответствующие работы на Западе. Но нельзя не

упомануть, что за рубежом это направление когнитивной науки сегодня переживает бурный расцвет и наверстывает упущенное время.

Разумеется, главное в книге Пепперберг — доказательство того, что попугаи могут говорить осмысленно, что они действительно могут понимать слова, свои собственные и произносимые собеседником. В связи с этим автор затрагивает и ряд крупных научных проблем, связанных с птицами.

Главная из них обусловлена особенностями мозга птиц, который по своей структуре радикально отличается от мозга млекопитающих. В связи с отсутствием новой коры исследователи были склонны считать его примитивным («разросшаяся подкорка»), а когнитивные способности птиц — заведомо ограниченными, несмотря на многочисленные проявления их сообразительности как в экспериментах, так и в спонтанном поведении. Этот парадокс объяснен относительно недавно, когда были получены данные о гомологии высших отделов мозга птиц (гиперпаллиума и нидопаллиума) и новой коры млекопитающих. Ряд свидетельств тому был получен уже после выхода «Alex and me» [18], и эти данные мы привели в предисловии к русскому переводу книги [19].

Монография «Алекс и я» интересна еще и тем, что возвращает нас в атмосферу 1970-х годов, когда Пепперберг (получив образование химика-теоретика) решила изучать мышление птиц. Ряд ученых США и нашей страны занимались мышлением животных, но данная проблема еще не получила той известности и признания и не привлекала того внимания, которым она пользуется сейчас. Теория условных рефлексов в России и бихевиоризм на Западе господствовали безраздельно, и попытки выйти за их рамки воспринимались негативно. Пепперберг ярко описала скепсис, с которым она столкнулась при попытке вторгнуться в эту полузапретную область. А на нее сильнейшее впечатление произвели так называемые языковые проекты 1970-х годов — эксперименты нескольких групп американских психологов, которые успешно обучали человекообразных обезьян простым незвуковым аналогам человеческого языка [11]. Ее непреклонное желание заниматься именно этой задачей, к тому же со столь экзотичным объектом, как попугай, да еще и с применением особого метода обучения, отличного от имеющихся в арсенале бихевиористов, воспринималось почти как крамола.

Надо сказать, что трудности были уделом Пепперберг на протяжении большей части жизни. У нее долго не было постоянного места работы, ей не удавалось получать гранты, и только ее самоотверженное упорство позволило ей шаг за шагом осуществлять свой план, «провести с попугаем те же опыты, что проводились с шимпанзе». Американский психолог поставила задачу *обнаружить и подтвердить наличие у африканского серого попугая жако <...> (который умеет при этом говорить) тех «языковых» и когнитивных*

способностей, которые ранее были зафиксированы в ходе работы с шимпанзе [14], и полностью ее выполнила.

Сэр Алекс — деятельный участник научного эксперимента

Работа с попугаем не ограничивалась для Пепперберг получением научных данных о его когнитивных способностях, но всегда находила живой эмоциональный отклик в ее душе. Из объекта экспериментов Алекс очень быстро превратился в полноправного участника процесса. Он не просто совершал те или иные действия, решал (или не решал) поставленные людьми задачи, но постоянно заявлял о своих желаниях, неудовольствиях, об отношении к экспериментаторам и т.п. Он однозначно давал понять, что ему нравится, а что — нет, как он относится к каждому из участников. Характерно, что в эту атмосферу эмоциональных контактов вовлекались все работавшие с попугаем и постоянно менявшиеся студенты, лаборанты, другие коллеги. С течением времени становилось все яснее, что Алекс не автомат, вырабатывающий условные рефлексы, а вполне самостоятельная личность со своими вкусами и наклонностями, довольно капризная и явно склонная к доминированию над окружающими, в том числе и над людьми. Недаром студенты называли его боссом или предлагали обращаться к птице «сэр Алекс». Свой характер он проявлял и в отношении других попугаев, когда участвовал в их обучении в качестве модели и (или) соперника.

Напомним, что первоначально Айрин не ставила задачи учить Алекса «языку», подобному тому, что усваивали и применяли «говорящие» обезьяны в языковых проектах американских психологов.



Алекс усвоил числительные от 1 до 7 и применял их к множествам разной природы.



На вопрос «какая цифра меньше» Алекс отвечал: «единица (зеленая)».

В тех исследованиях все происходило в атмосфере живого общения, тогда как для работы с птицей планировались только формальные аналитические эксперименты, обеспечивающие получение статистически достоверных результатов. «Наука любит цифры», — повторяла Айрин, заставляя Алекса в очередной раз выполнять похожие задания, что явным образом раздражало птицу.

Однако уже на первом году работы выяснилось, что Алекс воспринимает не только «урок», но и всю ситуацию в целом. Оказалось, что он прислушивается к разговорам окружающих во время экспериментов и по собственной инициативе усваивает фразы для контактов с ними. Именно так в его повседневном лексиконе появились фразы «Я хочу...», «Нет», «Иди сюда», «Спокойной ночи», «Спасибо», «Извини» и т.п. Он четко улавливал эмоциональную окраску высказываний людей. По собственной инициативе он освоил ласковые слова, с которыми обращались к нему или друг к другу люди, начал извиняться за ошибки и упрямство, которое проявлял, когда был не расположен работать. Поражает спонтанность подобного поведения птицы и то, что оно было основано на точном понимании эмоций, которые вкладывали в слова вежливости произносившие их люди. Затем возникало очень приблизительное подражание уловленному слову, которое экспериментаторы «оттачивали» путем кропотливой тренировки.

На второй год работы обнаружилось также, что Алекс умеет четко и понятно для окружающих выразить свои желания (а особенно нежелания). В последнем случае арсенал средств был особенно богат. Например, *...когда он не хотел идти на руку, он издавал громкий пронзительный звук, который наилучшим образом можно передать как gaaaaaak. Иногда он не только неприятно и пронзительно кричал, но и пытался укусить. Он делал это как бы на всякий случай — вдруг его*

сообщение было недостаточно ясным. В тех случаях, когда Алекс не хотел отвечать на вопрос о предмете, он просто игнорировал тренера: мог повернуться спиной или начать чистить перья. Чтобы показать, что больше не будет пить воду или работать с предметом, наименование которого он учит, он бросал его на пол. Если вы дадите ему банан, а он просил винограда, то дело могло кончиться тем, что этот банан оказывался у вас на голове. У Алекса был жесткий характер [14]. В ответ на все свои выпадения он постоянно ощущал неодобрение экспериментаторов и слышал от них слово «нет».

Постепенно в его лексиконе появился звук, отдаленно напоминающий это слово. Алекс сопровождал им, а потом и полностью заменил перечисленные выше акты выражения неудовольствия. Таким образом, он научился обозначать свое внутреннее состояние столь отвлеченным способом благодаря наблюдениям за людьми с их проявлениями негативных эмоций в разных ситуациях. Он перенял у человека прием словесного выражения плохого настроения.

Примечательно, что у Алекса появился способ выразить свое неодобрение по отношению к другим попугаям. Это было слово «курица». Он усвоил его сам, подражая студентам, которые так «обзывали» его за неправильные ответы. Наблюдая за обучением других попугаев, он часто вмешивался в процесс, указывая (чаще всего вполне справедливо): «Говори лучше» («Say better»). Это тоже был результат копирования поведения тренеров.

Характерно, что Алекс связывал слова даже с абстрактными понятиями (например, *сходство / различие, больше / меньше*). Более того, он придумывал собственные названия для «безымянных» объектов*: например, «камень-кукуруза» — сухие зерна, в отличие от свежих. И такое спонтанное усвоение слов, понимание смысла ситуации обнаруживалось до формирования соответствующего словесного «ярлыка», который Алекс начинал использовать. Год за годом его поведение так же, как и результаты экспериментов, с очевидностью подтверждало гипотезу Пепперберг, согласно которой попугаи способны понимать смысл произносимых ими слов.

* Способность расширять лексикон, изобретая названия для новых референтов, называется продуктивностью. И это — одно из основных свойств человеческого языка, которое совершенно отсутствует в коммуникативных системах животных, но проявляется как тенденция у человекообразных обезьян, обученных аналогам человеческого языка.

Но наиболее интересны случаи, когда Алекс демонстрировал свое понимание эмоционального состояния Пепперберг при возникновении сложных ситуаций. Она обнаружила это, когда получила из журнала «Science» первый отказ напечатать статью, который к тому же был сделан в хамской форме. Она, по ее словам, была очень огорчена: «Огорчена настолько, что Алекс сделал вывод... по-видимому, он считал, что я рассердилась на него. Он весь сжимался, когда видел меня» [14].

Пепперберг удалось также восстановить последовательность событий, после которых в лексиконе птицы появилось выражение «прости меня». Все началось с того, что Алекс изжевал только что отпечатанную заявку на грант, которую надо было в тот же день срочно отправлять в Национальный научный фонд. Это был 1979 г., эра компьютеров еще не настала, заявка была напечатана на чужой электрической машинке, и у Айрин осталось лишь несколько часов, чтобы успеть ее вновь напечатать, оформить и отослать.

На эту ситуацию я реагировала эмоционально, как многие люди. Я кричала на Алекса, это было глупо, но я кричала: «Как ты мог так со мной поступить, Алекс?!». Конечно, он мог так поступить — он же попугай. И тут Алекс использовал свои знания — фразу, которую он, как выяснилось, запомнил и позже использовал в подобных обстоятельствах: «I am sorry. I am sorry!». Т.е. «Прости. Прости!».

Это остановило меня. Я подошла к Алексу и попросила прощения: «Хорошо, Алекс. Это не твоя вина».

Как же Алекс додумался использовать эту фразу «I am sorry» («Прости»)? Незадолго до этого случая, когда он сжевал мою заявку на грант, Алекс сидел на жердочке наверху, мы болтали, отдыхали, наше общение не было связано с работой. Я пила кофе. Он чистил перышки, издавал различные звуки. Я поставила чашку и вышла вымыть руки. Когда я вернулась, увидела, что Алекс расхаживает по луже разлитого кофе, рядом лежала разбитая чашка. Я была очень напугана, опасаясь, что Алекс поранился. От страха я закричала: «Как ты мог это сделать?». Алекс, должно быть, случайно опрокинул чашку, когда подошел посмотреть на нее поближе. Но я все

равно кричала, пока не поняла, что веду себя глупо. Я наклонилась к Алексу, чтобы убедиться, что с ним все в порядке и сказала «I am sorry» («Прости»). Очевидно, он запомнил эти слова. Для него они были связаны с ситуацией потенциально опасной, когда на него кричали. Именно поэтому он использовал эту фразу в момент, когда я обнаружила, что он сжевал мою заявку на грант, и когда я, по глупости, стала кричать на него. Спрашивается, у кого из нас были птичьих мозги?» [14].

Надо сказать, что Алекс оказался совершенно незаурядной личностью, и за все годы работы ни одна птица не смогла с ним сравниться. Это тем более удивительно, что он был куплен в обычном зоомагазине и выбран хозяином наугад из группы таких же годовалых птиц. Айрин пишет, что она не раз размышляла о том, как сложилась бы ее биография, если бы продавец выдал ей другую птицу. Да и Алекс мог провести всю жизнь в одиночной клетке, не проявив своих выдающихся способностей, если бы попал в другие условия. Смерть Алекса, совершенно неожиданная, на фоне полного здоровья, ежедневно подтверждавшегося ветеринарным врачом, стала для Пепперберг настоящей трагедией. Это событие произошло как раз в тот период, когда ее жизнь стала налаживаться: она получила наконец постоянное место работы, выиграла грант, обеспечивавший проведение очередных экспериментов, к ней пришло признание коллег, а буквально за несколько минут до известия о смерти Алекса она узнала, что ее пригласили стать консультантом в крупном европейском проекте, посвященном эволюции языка (грант ITALK).

Но все сложилось, как сложилось, и благодаря Алексу Пепперберг вписала важную главу в изучение эволюции высших психических функций. Она показала, что элементарное мышление возникло не только у млекопитающих, но и у представителей другого, независимо эволюционировавшего класса позвоночных. Так же, как и у высших млекопитающих и у других высокоорганизованных птиц (врановых), спектр его проявлений оказался сопоставимым с человекообразными обезьянами, включая способность попугаев усваивать символы, самостоятельно оперировать ими и понимать, что они говорят. ■

Работа выполнена в рамках темы НИР «Нейробиологические и информационные основы поведения и функции сенсорных систем» (№НААА-А16-116021660055-1). Поддержана проектами РФФИ (10-04-00891-а; 13-04-00747-а; 16-04-01169-а).

Литература / References

1. Ильичёв В.Д., Силаева О.Л. Говорящие птицы. М., 1992. [Ilichev V.D., Silaeva O.L. Speaking birds. Moscow, 1992. (In Russ.)]
2. Крушинский Л.В. Биологические основы рассудочной деятельности: Эволюционный и физиолого-генетический аспекты поведения. М., 2018. [Krushinsky L.V. Biological bases of reasoning: Evolutionary and physiological-genetic aspects of behavior. Moscow, 2018. (In Russ.)]

3. Clayton N.S., Emery N.J. Avian models for human cognitive neuroscience: a proposal. *Neuron*. 2015; 86 (6): 1330–1342. Doi:10.1016/j.neuron.2015.04.024.
4. Auersperg A.M.I., Kűck C., Pledermann A. et al. Safekeeping of tools in Goffin's cockatoos, *Cacatua goffiniana*. *Animal Behaviour*. 2017; 128: 125–133. Doi:10.1016/j.anbehav.2017.04.010.
5. Wimpenny J.H., Weir A.A.S., Clayton N. et al. Cognitive Processes Associated with Sequential Tool Use in New Caledonian Crows. *PLOS ONE*. 2009; 4(8): e6471. Doi:10.1371/journal.pone.0006471.
6. Зорина З.А., Обозова Т.А. Вклад Л.В. Крушинского в изучение когнитивных способностей птиц и современное состояние этой проблемы. Формирование поведения животных в норме и патологии: к 100-летию со дня рождения Л.В.Крушинского (1911–1984). М., 2013; 115–148. [Zorina Z.A., Obozova T.A. L.V.Krushinsky's contribution to the study of cognitive abilities of birds and the current state of this problem. The formation of animal behavior in norm and pathology: to the 100th anniversary of the birth of L.V.Krushinsky. Moscow, 2013; 115–148. (In Russ).]
7. Смирнова А.А., Зорина З.А. Когнитивные способности птиц: обобщение, использование понятий, символизация, умозаключения. Формирование поведения животных в норме и патологии: к 100-летию со дня рождения Л.В. Крушинского (1911–1984). М., 2013; 148–168. [Smirnova A.A., Zorina Z.A. Cognitive abilities of birds: generalization, use of concepts, symbolization, thinking. The formation of animal behavior in norm and pathology: to the 100th anniversary of the birth of L.V.Krushinsky. Moscow, 2013; 148–168. (In Russ).]
8. Smirnova A., Zorina Z., Obozova T., Wasserman E. Crows spontaneously exhibit analogical reasoning. *Current Biology*. 2015; 25(2): 256–260. Doi:10.1016/j.cub.2014.11.063.
9. Obozova T., Smirnova A., Zorina Z., Wasserman E. Analogical reasoning in amazons. *Animal Cognition*. 2015; 18(6): 1363–1371. Doi:10.1007/s10071-015-0882-0.
10. Поletaева И.И., Перепелкина О.В., Зорина З.А. Когнитивные способности животных (рассудочная деятельность) в свете генетических представлений. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2017; 21(4): 421–426. Doi:10.18699/VJ17.260. [Poletaeva I.I., Perepelkina O.V., Zorina Z.A. Animal cognition (reasoning) in the light of genetic ideas. Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2017; 21(4): 421–426. (In Russ).]
11. Зорина З.А., Смирнова А.А. О чем рассказали «говорящие» обезьяны: Способны ли высшие животные к оперированию символами? М., 2006. [Zorina Z.A., Smirnova A.A. What about «speaking» apes told: Are the higher animals capable to operate with symbols? Moscow, 2006. (In Russ).]
12. Pepperberg I.M. The Alex Studies: Cognitive and Communicative Abilities of Grey Parrots. Cambridge, 1999.
13. Смирнова А.А. О способности птиц к символизации. Зоологический журнал. 2011; 90(7): 803–810. [Smirnova A.A. On the capability of birds for symbolization. Russian Journal of Zoology. 2011; 90 (7): 803–810. (In Russ).]
14. Пеннерберг А. Алекс и я. Сер.: Разумное поведение и язык. Зорина З.А., Бурлак С.А. (ред.). Пер. с англ. А.А.Кошелевой. М., 2017. [Pepperberg I. Alex and Me. Ser.: Language and reasoning. Zorina Z.A., Burlak S.A. (eds). Moscow, 2017. (In Russ).]
15. Ладыгина-Котс Н.Н. Предпосылки человеческого мышления. М., 1965. [Ladigina-Kots N.N. Premises of human thinking. Moscow, 1965. (In Russ).]
16. Фирсов Л.А., Чиженков А.М. Очерки физиологической психологии. СПб., 2003. [Firsov L.A., Chizhenkov A.M. Essays on physiological psychology. St.Petersburg, 2003. (In Russ).]
17. Фирсов Л.А., Чиженков А.М. Эволюция интеллекта (присущ ли разум животным?). СПб., 2004. [Firsov L.A., Chizhenkov A.M. Evolution of intelligence (do animals have a mind?). St.Petersburg, 2004. (In Russ).]
18. Olkowitz S., Kocourek M., Luuan R.K. et al. Birds have primate-like numbers of neurons in the forebrain. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2016; 113 (26): 7255–7260. Doi:10.1073/pnas.1517131113.
19. Зорина З.А. Предисловие научного редактора к книге А.Пепперберг «Алекс и я». М., 2017. [Zorina Z.A. (scientific ed.). Introduction to A.Pepperberg's book «Alex and Me». Moscow, 2017. (In Russ).]

Birds' Intelligence: Do Parrots Understand What They Are Saying?

Z.A.Zorina¹, A.A.Smirnova¹, T.A.Obozova¹

¹Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

The results of the long-term studies of parrots' thinking ability, conducted by the American psychologist I.Pepperberg, are discussed. She showed that these birds are comparable to great apes in their cognitive abilities. It is emphasized that the data of I.Pepperberg coincide with the results, obtained by the authors of this article in the study of corvids. A unique experiment on language learning of African parrot Jaco Alex is described. This bird learned not only the names of objects and actions, but also a number of concepts (more/less, similarity/difference). The ability of Alex to expand the lexicon by imitating people is demonstrated. The ability of the parrot to evaluate and to “name” the emotional state of others (anxiety, irritation, and fatigue) is noted.

Keywords: avian intelligence, parrots speech, origin of language.

Сейсмическая угроза мегаполису Стамбулу: возможные варианты

А.А.Никонов

Институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта (Москва, Россия)

В статье обсуждаются материалы к долгосрочному прогнозу сильного землетрясения на севере Мраморного моря, вблизи мегаполиса Стамбула. В 2016 г. в Турции был официально объявлен прогноз возникновения разрушительного землетрясения в районе Стамбула в течение ближайших 20–30 лет. Прогноз сделан по результатам изучения региональной геодинамики и анализа данных по скоростям латеральных смещений в сети GPS за последние 20 лет. В данной работе представлен альтернативный вариант локализации будущего очага, основанный на выделении дополнительного северного, вдольберегового разлома, обработке первичных сведений о разрушительных землетрясениях в прошедшие столетия и с учетом выявленной неравномерности в распределении современных латеральных тектонических перемещений в разных частях бассейна Мраморного моря. Обсуждаются возможные последствия грядущего события для мегаполиса Стамбула.

Ключевые слова: прогноз землетрясений, Северо-Анатолийский разлом, миграция сейсмических очагов, исторические землетрясения, Мраморное море, Стамбул, GPS-измерения.

Анаксимандр (630–546 гг. до н.э.) посоветовал жителям Лакедемонии (Спарты) покинуть город и провести ночь в деревне, так как будет землетрясение... Город действительно оказался в руинах.

Заголовок статьи — не сенсация и не фантазия кабинетного одиночки-умозрителя. Это научное заключение нескольких независимых международных групп исследователей. В июле 2016 г. в Интернете появилось следующее сообщение: «Район Мраморного моря — самый опасный в смысле возможности землетрясений во всем Средиземноморье: к такому выводу пришли авторы доклада, составленного по итогам исследования, проведенного учеными университета Богазичи [Босфорский университет] при финансовой поддержке ЕС. Непрерывный мониторинг [смещений] по Северо-Анатолийскому разлому проводился на протяжении трех лет, на основании полученных данных опубликовано свыше 30 докладов. Ученые считают, что сформировавшееся напряжение даже выше того, которое предшествовало катастрофичному по последствиям землетрясению 1999 г.».

Землетрясение 17 августа 1999 г. магнитудой $M = 7.4$, с эпицентром в Измитском заливе, в 70–80 км восточнее Стамбула, унесло жизни не менее 17 тыс.



Андрей Алексеевич Никонов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики Земли имени О.Ю.Шмидта. Область научных интересов — палеосейсмичность, сейсмотектоника, оценка природных опасностей. Постоянный автор «Природы». e-mail: nikonov@ifz.ru

человек, оставило десятки тысяч раненых и сотни тысяч бездомных.

В октябре 2016 г. появилось уточнение прогноза: «Магнитуда подземного толчка составит 7.6. Его необходимо ожидать в течение 30 лет», — заявил известный французский геофизик К.Ле Пишон газете «Хабер Тюрк»*. Это обоснованный долгосрочный научный прогноз. Прогнозы делали и раньше, но в основном кустарные и не оправдававшиеся. Но тут сообщает международная группа, с полной выкладкой материалов, с оценкой вероятности во времени. Не прислушаться нельзя. К тому же речь идет не о пустыне, не о джунглях. Стамбул — мега-

полис на международных путях. В данном случае заблаговременно выданный прогноз может быть в дальнейшем проверен публично (в том числе и многими читателями журнала).

Пока есть время (и необходимость) разобраться в ситуации в научном плане, тем более что прогнозные работы осуществляются в регионе не случайно и не на пустом месте. Здесь двухтысячелетняя предьстория землетрясений, уже было «предупреждение» в виде катастрофы 1999 г. Здесь принимаются совместные международные меры для выяснения опасности. В северной части Турции природа регулярно творит сейсмические бедствия, но там она подарила (в отличие от многих других сейсмоопасных регионов) возможность познать их систематику, закономерности распределения в геологическом пространстве и в обозримом времени. В этом регионе реализуется линейная миграция очагов сильных землетрясений вдоль крупных разломов [1, 2].

Введение — необходимое, но совершенно недостаточное

В общем ситуация в данном регионе довольно простая, в отличие от большинства сейсмогенных областей. Движение литосферных плит второго порядка здесь происходит в виде однонаправленного сдвига вдоль магистрального субширотного Северо-Анатолийского разлома. Сдвиг, как и выход очаговых разрывов с сопровождающими губительными эффектами, прослеживается на севере Анатолии разными способами. Смещение идет постепенно или с зацеплениями (задержками, ступором). Задержки возникают периодически, порождая временный дефицит смещений на очередном участке, накопление на нем напряжений (до определенного предела), с последующим срывом в виде сильных землетрясений.

Но у западного окончания Северо-Анатолийского разлома, в области перехода к впадине Мраморного моря, единый (или восточнее парный) магистральный (стволовой) разлом расщепляется на несколько ветвей, в основном скрытых под водами бассейна. Тут перераспределяются скорости смещений, места и периоды задержек и возникновения очагов очередных событий. Именно в бассейне Мраморного моря ситуация сильно усложняется, ибо пространственно-временной ход событий становится переменным. Очаги землетрясений там зафиксированы на трех установленных геологическими и геофизическими методами ветвях разлома в центральной части бассейна Мраморного моря и к югу от него. Но до самого последнего времени локализация очагов сильных землетрясений прошлого оставалась неоднозначной и малообоснованной.

Многие исследователи различными способами в разное время одинаково выводили основные

черты геодинамики Северной Анатолии: правосторонний сдвиг по Северо-Анатолийскому разлому, связь именно с ним очагов сильных землетрясений и повторяющееся (хотя не обязательно с одинаковой скоростью) смещение сейсмических очагов с востока к западу (латеральная миграция). Эти базовые позиции открывали возможность для общих прогностических ожиданий. Однако разрушительное землетрясение 1999 г. восточнее Стамбула никто не ожидал. Оно застало врасплох и стало настоящей катастрофой [3].

В августе—сентябре 1999 г., т.е. когда турецкий сейсмолог А.Барка писал статью о катастрофе в журнал «Science» [3], я готовил статью в «Природу»*. Любопытно (даже мне самому) взглянуть, что тогда, по свежим следам катастрофы, предвиделось. «В первой половине следующего века район возможного возникновения землетрясений, скорее всего, переместится к западу... Самым важным для специального последующего изучения надо считать участок вблизи Босфора, на берегах которого расположен Стамбул с 12-миллионным населением... Этот район (согласно письменным свидетельствам) многократно подвергался сокрушительным землетрясениям... следующее землетрясение в районе Стамбула можно, по-видимому, ожидать в течение 25–50 лет». Прошло почти 20 лет. Ни ссылок, ни реакции на предупреждение мне встречать не приходилось.

Однако несколько международных научных групп с участием турецких специалистов быстро развернули работы в районе. Уже в 2000 г. независимо и по другим данным появилось первое предсказание: «Вероятность сильных сотрясений в Стамбуле — $62 \pm 15\%$ в течение 30 лет, $50 \pm 13\%$ в следующие 22 года (т.е. до мая 2022 г.), а с вероятностью $32 \pm 12\%$ — в последующие 10 лет» [4, с.664]. Место будущего очага не указывалось, но опасность для Стамбула сомнению не подвергалась. Публично о прогнозе готовящегося землетрясения в Турции было объявлено 22 июня 2016 г.

Исследования — целеустремленно, навстречу угрозе

С начала XXI в. исследования велись несколькими международными группами специалистов совместно с турецкими коллегами. Их результаты публиковались в научной печати и в публичных изданиях [5–8]. На западном, усложненном участке вот уже четверть века действует сеть GPS (с большим охватом и высокой точностью измерений), обеспечивающая информацию о сдвиговой кинематике с достаточной определенностью. Одна из главных особенностей структуры и геодинамики региона, в отличие от других сейсмогенных областей

* Никонов А.А. Сейсмическая катастрофа в Турции // Природа. 1999. №11. С.3–9.

тей, заключается в том, что разломная зона и каждая ее ветвь имеют вертикальное заложение на всю (13–18 км) мощность сейсмогенного слоя и кинематику практически чистого сдвига [6, 8]. А это означает: получаемые у поверхности характеристики движения по разломам можно распространять на глубину, что в первую очередь относится к измерениям GPS.

Но вот беда, до самого последнего времени локализация очагов сильных землетрясений прошлого у разных исследователей различалась и была плохо обоснована. К тому же, как правило, отсутствовали необходимая аргументация и пояснения к процедуре получения результатов. Какой же при этом прогноз?

В Институте физики Земли РАН в лаборатории сейсмической опасности плановые разработки прогностической направленности велись применительно к тихоокеанскому побережью. На континентальные районы, да еще за рубежом, ни планов, ни грантов, ни договоров не было, как и надежды на них (их и до сих пор нет). Была свобода, понимание опасности и первостепенной значимости темы и района в одной отдельно взятой голове. В 2016 г. в лабораторию пришла молодая сотрудница — начинающий геофизик А.О.Королёва. Появился шанс. И мы занялись углубленной разработкой вопроса — прежде всего знакомством с иностранной литературой. Предстояло выяснить, насколько за последнее десятилетие зарубежные коллеги продвинулись в прояснении трех основных вопросов: в уточнении позиции и кинематики сейсмогенных разломов в Мраморном море, в определении скорости правостороннего смещения по каждому из них и в распределении очагов и характеристик прежних сильных землетрясений в бассейне.

И тут выяснилось... Удивление наше было глубоким: огромные достижения в геологической части и в измерении текущих перемещений по разломам и явные упущения в исследованиях сильных землетрясений прошлого в северной части бассейна и непосредственно в Стамбуле. Большую работу по изучению землетрясений исторического времени в Малой Азии, главным образом разрушительных, проделал Н.Н.Амбрассейс [9–11]. Недаром без конкретных ссылок на его публикации серьезные современные исследователи не обходятся. Но, как известно, не делает пропусков и не ошибается тот, кто ничего не делает. Вот только цена упущений и ошибок разная. В академической, огромной по масштабам работе пропуски и неточности могут оставаться незамеченными и не приносить особого ущерба. Но в случае оценки опасности в конкретном районе, а тем более при выработке прогнозных оценок и ожиданий... тут уж дьявол, действительно, кроется. С обработкой первичных материалов по историческим землетрясениям на современном уровне дело обстояло неблагоприятно. В первую очередь — по разру-

шительным событиям XVI—XIX вв., возникавших на севере Мраморного моря, т.е. опорных при оценке сейсмической опасности Стамбула и его окрестностей. В работах Амбрассейса по Турции главная очаговая область в северной части Мраморного моря помещается в Измитском заливе, т.е. на крайнем востоке бассейна — там, где в 1999 г. разразилась катастрофа. Так ли это?

Пропуск звена — распад цепи

Изучая в 80–90-е годы сейсмичность Крыма, Кавказа, Черноморья, я не мог пройти мимо трудов известного русского геолога академика Н.И.Андрусова. В 6-томном собрании его сочинений попала заметка «Экспедиция на «Селянике»». К Черному морю она не относилась и потому усвоена не была. Но в голове название угнездилося. «Всплыл» «Селяник» в конце 2016 г., когда мы с Королёвой занялись Мраморным морем и «берегом турецким». Заметка оказалась интересной сама по себе, ибо экспедиция прошла в 1894 г. по местам (по водам), где за месяц до нее (10 июля) произошло сильное землетрясение с $M = 6.6$ в том же районе Мраморного моря, что и катастрофа 1999 г. Но самое интригующее оказалось в сноске внизу последней страницы, мелким шрифтом. Андрусов указывал на статью с фамилией автора, в современной литературе не появлявшейся. Публикация — во французском журнале, на французском языке [12]. В российских библиотеках журнала не оказалось. Статья весьма содержательная, с макросейсмической картой, с двумя десятками пунктов с сообщениями фактических сведений, нашлась в Интернете. Автор — директор сейсмологической обсерватории в Афинах Д.Эгинитес. По свежим следам он обследовал последствия и опрашивал очевидцев. Нечастый для того времени случай. Нигде в известных источниках ссылок на эту работу не было. Даже у мэтра-сейсмолога, специалиста по Ближнему Востоку Амбрассейса и его многочисленных последователей. Ценнейшие фактические данные по региону, столь важные в нынешней ситуации, оказались забытыми. Как только мы копнули источники первичных сведений «вглубь» истории, обнаружили неучтенные письменные сообщения современников событий, местных жителей, случайных очевидцев и профессионалов. Только не на английском языке, а на французском, немецком, греческом и... на русском.

Важные сведения и суждения о землетрясении 1894 г. (и более ранних) мы почерпнули из статьи Й.Дюка [13]. Работы его и других немецких авторов также остались невостребованными. Они однозначно помещали «центр землетрясения» вблизи Принцевых о-вов, но не восточнее. Эгинитес определял его «ось» как тектоническую линию вдоль берега, к западо-северо-западу, фиксировал последовавшие афтершоки и их тектонические

проявления на суше и в водной среде [12]. Землетрясение, следовательно, имело место намного ближе к Стамбулу.

На русском языке сразу после события появились две публикации, в том числе рассказ русского писателя А.В.Амфитеатрова, в то время находившегося в Стамбуле*. Другая никогда не использованная сейсмологами заметка нашлась в старой русской газете**. Обе публикации сообщали о воздействии землетрясения в Стамбуле и частично на Принцевых о-вах. Бесценный материал для доинструментального периода, при современных методах исследования абсолютно необходимый. В газете также были помещены четыре рисунка — как люди вели себя в городе при самом землетрясении и в какой обстановке оказались после него. находка! На одном панорамном рисунке — толпа в безумной панике на мосту через бухту Золотой Рог (рис.1). Это не VII баллов, это не менее VIII. И деталь на заднем плане: падает верхняя часть одного из минаретов. По описаниям известно, что тогда обвалилось несколько минаретов, при этом были задавлены люди. Так происходит при сотрясениях не менее VIII баллов. В моем архиве нашелся не известный сейсмологам рисунок мечети, разрушенной землетрясением в Шемахе, на Кавказе (рис.2). В базовом каталоге интенсивность этого землетрясения 11 июля 1859 г. определена в VIII—IX(± 0.5) баллов [14].

Наша работа, естественно, сосредоточилась на письменных характеристиках события во всех обнаруженных нами заново первоисточниках. Материалы оказались столь разнообразными и представительными, что уже в 2017 г. появились две статьи с неизвестными фактами и новыми решениями [15, 16]. По сведениям нескольких исследователей [9, 12, 13 и др.] мы со-

* Амфитеатров А.В. Землетрясение в Стамбуле 1894 г. СПб, 1904. С.53–56.

** Землетрясение в Константинополе // Всемирная иллюстрация. СПб., 1894. Суббота 23 июля. Т.52. №1330. С.61, 62, 67.



Рис.1. Паника на мосту через бухту Золотой Рог во время землетрясения 10 июля 1894 г. На заднем плане: в центре — мечеть Айя-София, по краям — разрушенные жилые строения, слева — падающий минарет. Художник А.Бианчини (по наброску Д.Ларини).



Рис.2. Разрушения на мечети с минаретом и на прилежащем культовом сооружении (на переднем плане) вблизи г.Шемахи на Кавказе после землетрясения 1859 г. Литография А.Мюнстера по рисунку О.Г.Хиппиуса, 1861 г.

ставили первую на уровне современных требований макросейсмическую карту сильного землетрясения, случившегося 10 июля 1894 г. [16]. По распределению 22 пунктов с установленной интенсивностью сотрясений и по комплексу других согласующихся между собой признаков была околонтурена эпицентральная область и оценены

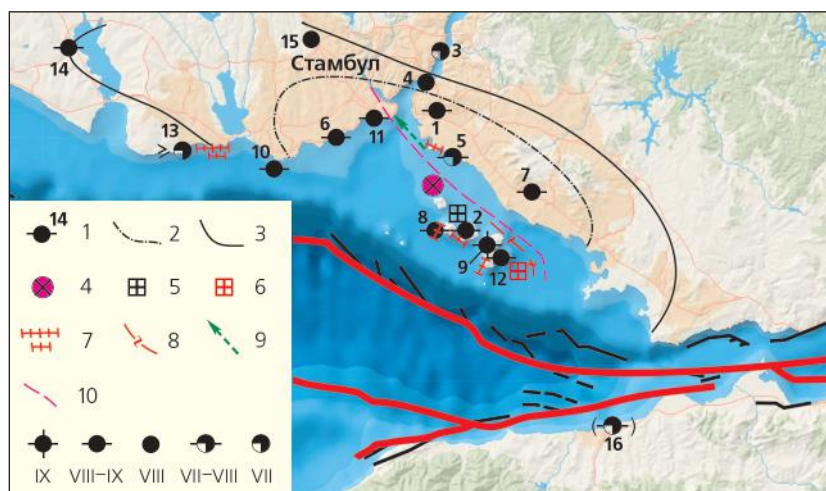


Рис.3. Карта разломов восточной части бассейна Мраморного моря, макросейсмических данных и сеймотектонических проявлений в приэпицентральной области землетрясения 10 июля 1894 г. Красными и черными линиями показаны разломы по зарубежным данным: красными — основные на дне по детальным съемкам, черными — главные ветви Северо-Анатолийского разлома. 1 — пункты наблюдений с указанием интенсивности в баллах; 2 — изосейста VIII–IX баллов; 3 — изосейста VIII баллов; 4 — эпицентр (по данным SHEEC — европейского каталога землетрясений); 5 — геометрический центр макросейсмического поля (по нашим данным); 6 — точка начального вспарывания (по нашим данным). 7–10 — сейсמודинамические проявления при землетрясении: 7 — трещины на земной поверхности; 8 — места разрыва подводного кабеля; 9 — трасса движения выброса флюидов на водной поверхности; 10 — намечаемая трасса вскрытия вдольберегового разлома. Составили А.А.Никонов и А.О.Королёва, 2018 г.

главные очаговые параметры (рис.3). Длинная ось макросейсмического поля оказалась вытянутой вдоль северо-восточного берега Мраморного моря по азимуту западо-северо-запад 300° , а эпицентр уверенно определен вблизи Принцевых о-вов, т.е. восточнее Стамбула [15, 16], но не у г.Измита, что значительно восточнее, как было принято в большинстве публикаций [4, 11, 17, 18].

Мало того, в первых публикациях описывались признаки (впоследствии забытые наглухо) активизации с выходом к поверхности разрывов поблизости от Стамбула и, возможно, в самом городе при нескольких сильных землетрясениях прошлого. Наиболее показателен пример явлений при июльском событии 1894 г. на мелководном шельфе около Принцевых о-вов. В двух местах здесь порвался подводный кабель (что обычно отвечает подвижке по местному разлому). На о.Принкипо не только накануне землетрясения, но и два дня спустя наблюдали на поверхности моря узкую полосу сероватого тумана, которая распространилась на 3 км в направлении с юго-востока на северо-запад. Такое повторное, по одной линии, явление соотносится с возникновением (раскрытием) трещины на дне в прибрежной зоне. Поблизости, на других островах, отмечались трещины и на суше, что также обычно отвечает очаговой зоне землетрясения. Естественно считать, что такой раз-

рыв появился на месте существовавшего разлома.

Отдельно возник вопрос (ранее, похоже, даже не встававший) о наличии (или отсутствии) продолжения активного разлома под самим городом. Протяжение выявленных признаков разрыва при землетрясении 1894 г. от Принцевых о-вов к западо-северо-западу, в сторону залива Золотой Рог (в Старом городе), говорит о его возможном продолжении. Для проверки мы привлекли доступные геоморфологические и геологические данные. Территория европейской части Турции к западу от пролива Босфор относительно ровная, с общим наклоном поверхности к юго-востоку. Здесь согласно общему уклону проходят долины нескольких немногочисленных рек. На всем их протяжении они прямолинейны, кроме одной — той, что впадает в вершину залива Золотой Рог. Эта долина, имея верховья вблизи северного окончания Босфора, сначала идет на юго-юго-запад вдоль его западного борта, а ниже по течению изги-

бается дугой и в верховья залива впадает, направляясь уже к юго-востоку. Так же изогнута в сторону моря и вершина самого «рога». Такой изгиб долины при маловодности речки не позволяет относить ее «выкрутасы» за счет эрозии, а заставляет думать о предопределенности долины геологическими условиями — литологией пород и разрывной тектоникой. Действительно, на геологической карте (рис.4) отчетливо видно, что ось залива Золотой Рог проходит по ровному контакту северо-западной ориентации между девонскими породами фундамента на северо-востоке и раннетретичными мягкими отложениями на юго-западе [13]. Возникновение подобного контакта отвечает резкому опусканию в начале новейшего периода юго-западного блока относительно противоположного не иначе как по разлому. Но как объяснить изгиб долины в средней ее части, внутри единого массива девонских пород? Случайным такой «выверт» быть не может.

Обратимся к кинематике смещений по Северо-Анатолийскому разлому, по его ближайшей, северной, ветви. Самый северный разлом вдоль северо-восточного побережья Мраморного моря, к востоку от Стамбула (как и более южные ветви), — правосторонний сдвиг. Золотой Рог — его окончание. Окончания крупных сдвигов, как правило, осложнены боковыми отростками-хво-

стами, по которым происходит раздвиг расщепляемых блоков земной коры. Эта щель может отходить от конца сдвига под острым углом, а может изгибаться дугой в обратную сторону. Именно так и повел себя хвост разлома под Золотым Рогом, по-видимому, и предопределив появление самого столь необычного залива. Но произошло это не в начале неотектонического этапа, а гораздо ближе к нашему времени, в плейстоцене, потому дуга и выражена так рельефно.

В главных позициях в отношении условий и характеристик ожидаемого события у зарубежных исследователей и у российских ученых из ИФЗ РАН расхождений нет:

- очаг события связан с постоянным правосторонним тектоническим смещением по Северо-Анатолийскому разлому;

- эпицентральная область возникнет в относительной близости к Стамбулу, и землетрясение может иметь разрушительные последствия во всем городе;

- с высокой вероятностью событие ожидается в ближайшие десятилетия.

Вместе с тем тщательная проработка пропущенных ранее первичных материалов по событию 1894 г. (и более ранних) позволила не только уточнить позиции очагов предшествовавших землетрясений, но и обнаружить самую северную, ближайшую к Стамбулу, вдольбереговую ветвь Северо-Анатолийского разлома (рис.5). На всех картах региона она отсутствует [6, 7, 10, 11, 18], хотя в вопросе об опасности мегаполиса этот разлом играет ключевую роль. Мы назвали его Северным Мрамороморским разломом (NNMF), в отличие от Центрального Мрамороморского (CMF), который считался самым северным. Откорректированная в 2018 г. карта макросейсмического поля землетрясения 1894 г. наряду с картой последнего, более сильного землетрясения 1999 г. могут служить модельными для рассмот-

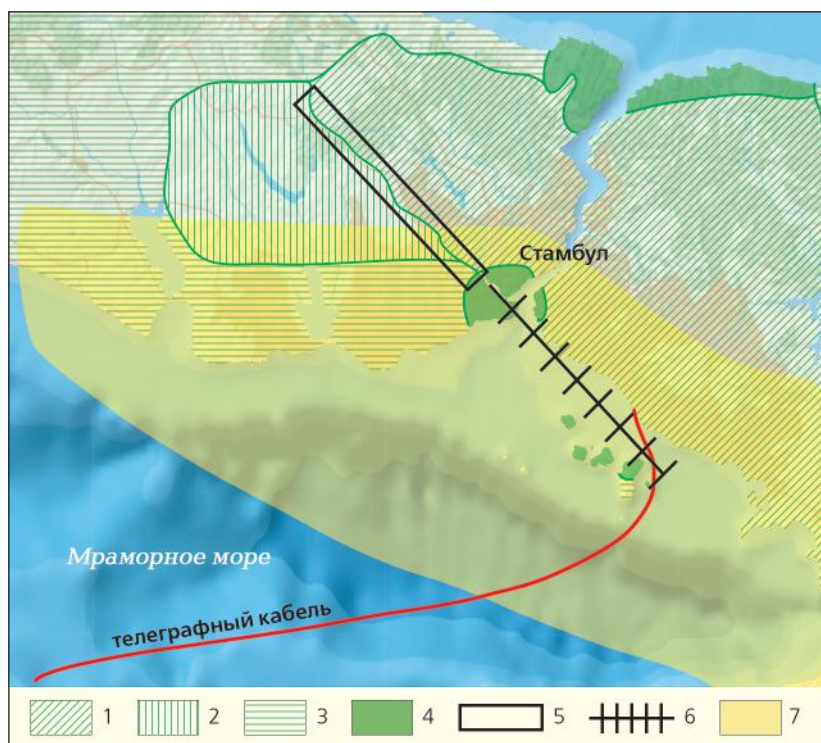


Рис.4. Геологическая карта северо-восточной части бассейна Мраморного моря [13]. 1 — девонские отложения, 2 — ранние третичные отложения, 3 — поздние третичные отложения, 4 — вулканические породы, 5 — линейный контакт (тектонический?) между девонскими и раннетретичными отложениями, 6 — предполагаемая трасса вскрытия вдольберегового разлома при землетрясении 1894 г., 7 — плейстоценовая область [15, 16].

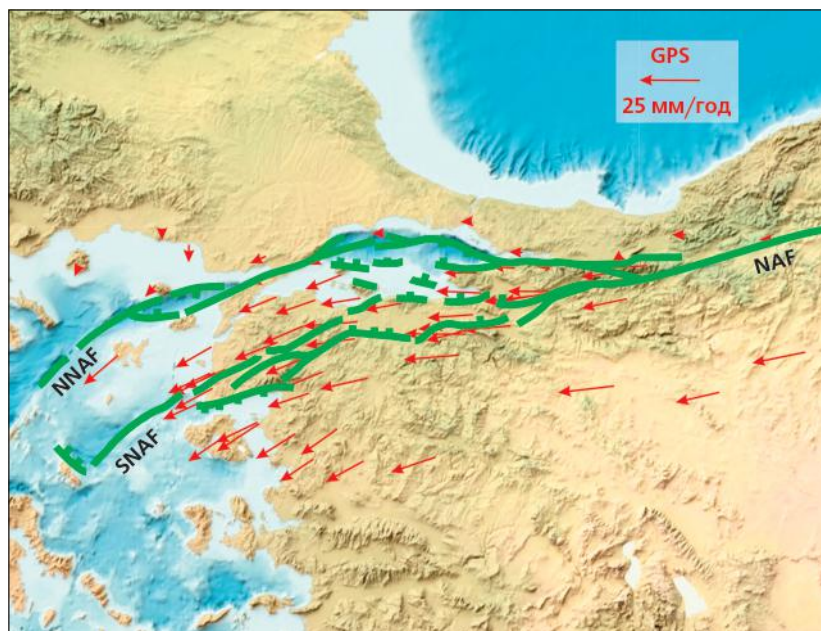


Рис.5. Схема разветвления (показано зелеными полосами) Северо-Анатолийского разлома (NAF, NNAF — северная составляющая, SNAF — южная) к западу в бассейне Мраморного моря и результаты GPS-измерений: векторы и значения скорости смещений обозначены красными стрелками [6].

рения других сильных событий с очагами на субширотных разломах (ветвях Северо-Анатолийского) в бассейне Мраморного моря [19, 20]. В пользу активизации северной, вдольбереговой, ветви разлома к востоку от Стамбула за 140 лет до 1894 г. указывают также обработанные заново первичные материалы по оставшемуся в тени событию 1754 г.

Для севера бассейна Мраморного моря наши данные кардинально меняют структурно-динамическую картину и представления о пространственно-временном распределении там очагов сильных землетрясений за последние столетия. Этот, более опасный, вариант — альтернатива выдвинутому зарубежными исследователями варианту, в котором эта самая северная ветвь с вероятными очагами древних сильных землетрясений не была распознана (рис.6). В этом состоит **первое важное отличие** нашей оценки грозящей городу опасности.

За прошедшее со времени катастрофы 1999 г. двадцатилетие несколько сильных групп зарубежных специалистов значительно продвинулись (в первую очередь — в исследованиях геокинематики), проводя мониторинг горизонтальных смещений в регионе с помощью GPS. Здесь они рассчитываются относительно стабильного пункта на Евро-Азиатской плите. На площади региона векторы, скорости и величины смещений резко различаются. В южной половине бассейна широтное (к западу) перемещение идет со скоростью 16–19 мм/год, тогда как на севере, вплоть до побережья Черного моря, если и выявляются перемещения в несколь-

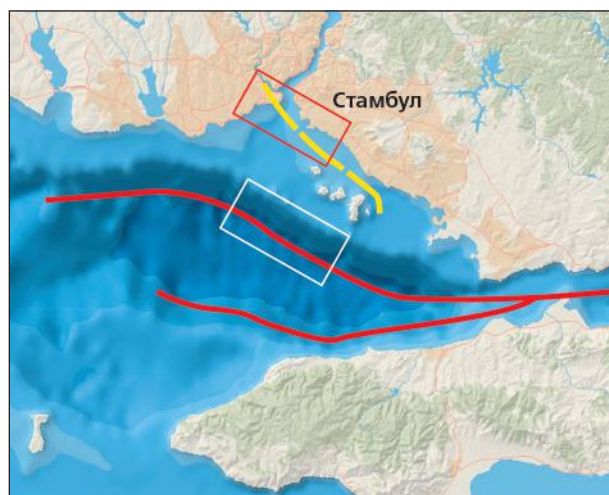


Рис.6. Схема расположения основных разломов в северо-восточной части бассейна Мраморного моря и варианты определения местоположения потенциального сильного землетрясения. Основные разломы показаны толстыми цветными линиями: красными — по зарубежным источникам, желтыми — по нашим данным [15, 16]. Участки вероятного положения очага готовящегося землетрясения белым прямоугольником — по данным зарубежных авторов, красным — по нашим [15, 16].

ких местах на побережье, то их величины на порядок меньше, т.е. данный Босфорский массив почти стабилен [6–8]. «Дефицит» относительных перемещений на севере оценивается в 2.5–3.7 м, что предполагает накопление напряжений, достаточных для сейсмической подвижки при землетрясении с $M = 7-7.6$ [8]. В варианте зарубежных исследователей очаг следующего сильного землетрясения возникнет на разломе СМФ, в середине акватории, в 30–40 км к югу от Стамбула. Но почему предстоящий срыв ожидается именно здесь? Если бы зарубежные коллеги знали о северном, вдольбереговом разломе и об очагах прошлых сильных землетрясений на нем, они, вероятно, судили бы иначе. Но и полученные ими важнейшие данные о смещениях можно трактовать по-другому. Дело в том, что к северу от СМФ пространство шириной 30–40 км занято акваторией и абсолютно не обеспечено пунктами измерений GPS. В такой ситуации вариант очередного разрыва на дне акватории или внутри северного заблокированного сухопутного пространства, где в 1894 г. вспоролся вдольбереговой разлом, оказывается вполне реальным. Именно его участок у Стамбула, где последнее сильное событие произошло около 300 лет назад (в 1719 г.), резонно считать наиболее вероятной конкретной структурой, которая сможет продуцировать ожидаемое землетрясение. Да и в центральной части бассейна линия разлома не единичная. Ранее позиция очагов сильных землетрясений прошлого оставалась неопределенной. У разных исследователей она различалась на несколько долей градусов, т.е. на десятки километров. Так намечилось **второе основное отличие** нашего варианта трактовки будущих событий. Благодаря собранным данным по историческим землетрясениям расположение очагов нескольких из них удалось локализовать достаточно определенно. Но есть и **третье важное отличие**.

Очаг под Стамбулом?!

Стамбул — город уникальный и по своему геологическому положению, и по своей двухтысячелетней истории с постоянными землетрясениями разрушительной силы, проявлявшимися почти каждое столетие. Это открывает перспективу с большей обоснованностью локализовать эпицентральные области, наметить последовательность перемещения очагов и интервалы между сильными событиями, определить простирающие длинные оси макросейсмического поля, узнать конкретные проявления разрывов — показателей (при)очаговых подвижек, установить возникающие здесь негативные и разрушительные последствия.

Это ли не набор сведений для того, чтобы выявить закономерности сейсмогеодинамики и предвидеть ход и эффект очередного мощного землетрясения?

Подходы специалистов к решению конкретной задачи за рубежом и у нас различные. Наши коллеги имели возможность (и отлично ее использовали) применять современные технологии на месте. В Москве мы ограничивались углублением в исторические источники по сильным землетрясениям прошлого в регионе и в городе. Причины понятны. Следствие: надо объединять результаты. Важно, что разные группы зарубежных исследователей в целом сходятся в прогностических суждениях о грозящей Стамбулу опасности. Но конкретные сценарии вероятного развития события и его последствий пока не появлялись. Сделать это без погружения в историю сильных землетрясений на севере бассейна Мраморного моря нельзя. В разных источниках только за 1-е тысячелетие н.э. можно найти сообщения о двух-трех десятках событий с упоминанием Стамбула (Византия, Константинополь). Но в большинстве случаев невозможно установить, находилась ли эпицентральная область у города или в другой части Мраморного моря.

На протяжении трех последних веков не было зафиксировано ни одного сейсмического события с эпицентром у южного входа в Босфор, т.е. под самим городом. Во всяком случае, таких данных в каталогах нет. Но «каталог не догма, а руководство к действию» (высказывание известного советского сейсмолога Н.В.Шебалина, который сам составлял многие каталоги). Сильные землетрясения Средневековья с очагами в северной части бассейна Мраморного моря в решении этого принципиального вопроса помочь не могли, поскольку ни по одному из них невозможно было построить карту макросейсмического поля и наметить с достаточной определенностью области эпицентров.

Прояснение пришло со стороны неожиданной. Много лет назад, при изучении мощных глубокофокусных землетрясений зоны Вранча в Карпатах, я обратил внимание на странность в сведениях об одном из сильнейших землетрясений 26 октября 1802 г. В нескольких публикациях сообщалось, что сотрясения ощущались даже в Москве, а также на о.Итака в Средиземном море и в Константинополе. В Москве — неудивительно, ибо подобное фиксировалось и раньше, и позже (москвичи помнят, например, мартовское событие 1977 г.). А вот чтобы сотрясения от очага под горами Вранча ощущались на о.Итака и в Стамбуле — такого не было. Да и по расчетам затухания ощутимые сотрясения на столь дальних расстояниях не получаются. Сомнения сохранялись, решения не было. До тех пор, пока недавно мы не обнаружили сообщения о природных событиях в газете «Санкт-Петербургские ведомости»*. Там «черным по белому» было написано, что землетрясение в Стамбуле возникло на сутки раньше Карпатского — 25 октября, т.е. оно самостоятельное, мест-

ное. При этом ни один пункт в окрестностях Стамбула не упомянут. Значит, был сейсмический очаг и под Стамбулом — даром что «сработал» он в 1802 г. несильно, около VII баллов. Главное — высветился. Не гром, но звонок. Это местное землетрясение в Стамбуле — не единственное в истории. К нему можно присоединить, например, землетрясение 7 августа 1742 г., которое навело страх на жителей города (VI–VII баллов). В турецком каталоге [17] оно отсутствует, но сообщение о нем также появилось в газете «Санкт-Петербургские ведомости». Есть и иные подозреваемые.

За знаниями и опытом вглубь времен

Хотя район Мраморного моря — один из тех в Европе, где сейсмическая история насчитывает два тысячелетия [9, 17], полные сведения о землетрясениях начали появляться только с XV в. Весьма детально изучено событие 1894 г., карта его макросейсмического поля стала опорной для региона [16, 19] — так же, как материалы и макросейсмическая карта катастрофического землетрясения 1999 г. [20]. Рационально поэтому ограничиться несколькими предшествующими столетиями. Обратимся к двум наиболее важным событиям вблизи Стамбула.

25 мая 1719 г. Тщательно собранные сообщения современников о событии 1719 г. [12] в дальнейшем проинтерпретированы как проявление сильного землетрясения с эпицентром в Измитском заливе, на удалении 80 км к востоку от Стамбула. Между тем, по конкретным сведениям в этом труде, как и по более ранней публикации [21], не менее правомерен вариант признания двух отдельных толчков в двух разных очагах — Стамбульском и Измитском. В греческом описательном каталоге мы находим, что очаг землетрясения 1719 г. располагался на месте Стамбула и интенсивность сотрясений там достигала VIII–IX баллов [21]. Это подтверждается и независимо созданным планом западной части города, на котором обозначены 10 мечетей, подвергшихся разрушению или повреждению [9]. Магнитуда события оценена в 7.4.

Примечательна продолжительность землетрясения — целых три минуты, что больше присуще сильным событиям в эпицентральной, нежели в дальней (как на Измитском участке) зоне. Второй толчок был отмечен час спустя после главного, а афтершоки продолжались в течение месяца, причем с точным указанием на г.Измит и окружающие деревни. Сила события там, как примерно и в Стамбуле, определяется в VII–VIII баллов, но о сотрясениях, которые в промежуточной полосе длиной 80 км (если это было одно и то же событие) должны быть более сильными, ничего не известно.

Так, по двум признакам, временному и пространственному, резонно допустить два события

* Санкт-Петербургские ведомости. 1802. №101. 19.12(XII).

с разными очагами: сначала в Стамбуле, а через час около Измита. В дальнейшем подобная ретромиграция очагов (возникновение второго в тылу первого) сильных землетрясений на этом же участке надежно фиксировалась специалистами при мощных землетрясениях 1894 и 1999 гг.

Наше рассмотрение с привлечением ряда пропущавшихся ранее сведений определенно свидетельствует о расположении очагов событий 1719 и 1894 гг. в окрестностях Стамбула. Первое из них случилось в непосредственной близости к нему. Это вполне согласуется с ранним указанием на два события «первой категории», принесшие городу большие бедствия [13]. Все изложенное позволяет предполагать существование двух сильных землетрясений, возникших в различных очаговых областях, на разных зонах разломов. Первое, особой силы, могло спровоцировать второе. Основываясь на сведениях из турецкого каталога [17] о серии из пяти землетрясений в 1720–1737 гг. с интенсивностью VI–VII баллов и с заключительным толчком VIII баллов в Стамбуле (без указания других соседних пунктов), резонно полагать, что в этот период прорабатывался очаг под самим городом.



Рис.7. Башни древней стены Феодосия в Стамбуле с антисейсмическими поясами и со следами обрушения и растрескивания за счет сильного (\geq VIII баллов) землетрясения. Снимок 2018 г.

Фото А.О.Королёвой

10 мая 1556 г. Это событие присутствует во всех каталогах, причем с высоким значением магнитуды 7.1 [11]. При оценке интенсивности сотрясений на территории Стамбула, как обычно, использовали письменные сведения. Но, как и в случае с землетрясением 1719 г., разные авторы расходились в определении параметров события и соотносили его с разными ветвями Северо-Анатолийского разлома. Эпицентр поэтому помещался в разных местах — от окрестностей Стамбула до удаления от него на 85 км к юго-западу [11]. Амбрасейс отмечал, что «разрушения достигли Стамбула» [9]. Более того, они продолжались там несколько дней. А по первоисточникам, собранным в той же книге, землетрясение именно в Стамбуле характеризуется как «ужасное». При нем было разрушено много башен, стен, прекрасных зданий, бесчисленное число домов, пострадала мечеть Айя-София, погибло много людей (рис.7). Разрушения такого характера соотносятся с воздвигнутыми VIII–IX баллов. Какова же была интенсивность в намеченном авторами эпицентре, удаленном от Стамбула на 85 км? Для сравнения: при последнем землетрясении 17 августа 1999 г. $I_0 = X$, с эпицентром в Измитском заливе в Стамбуле, на расстоянии 70 км к западу от восточного закругления X-балльной изосейсты (кстати, очень узкой), сотрясения не превысили VII баллов [20].

В рассказах очевидцев землетрясения 1556 г. [9] обращает на себя внимание отдельное сообщение о том, что вдоль залива Золотой Рог, на северо-западе Стамбула, разрушились многие минареты и строения, башни, часть городских стен. Этот факт становится в каталогах понятным теперь, после выявления разлома, по-видимому, активного, глубоко вдающегося в сушу под заливом в северо-западном направлении.

При изучении данного события мы использовали и старинную гравюру*. На ней изображен старый город к западу от пролива Босфор с тремя оборонительными стенами и морским побережьем, с кораблями на переднем плане (рис.8). На среднем и заднем планах вырисованы ряды двух- и трехэтажных строений с двускатными крышами, несколько мечетей и колонна Феодосия, за которой различается и мечеть Айя-София. Иными словами, элемент реалистичности в изображении, если и не преобладает, то присутствует. Это важно. При детальном рассмотрении рисунка можно выделить две группы разрушений в строениях — вдоль побережья (на переднем плане) и в глубине города. Отдельного внимания заслуживают люди на улицах: бегущие в страхе и смятении и лежащие распластанно (неподвижно?) между домами. В первой группе девять-десять фигур, а во второй — шесть-семь. Так мы узнаем, что были погибшие, раненые и выжившие. Соотношение количества фигур, по-видимо-

* См.: Никонов А.А. Первое крещение русов // Природа. 2007. №5. С.60–64.

му, может отражать относительно значительное количество погибших и раненых. Интенсивность события оценивается примерно в VII–VIII баллов.

Сравнение карты старой части Стамбула с общим контуром изображенного на гравюре города, ключевых объектов внутри него и участка моря на переднем плане позволило определить положение панорамы — с юга на север. Таким образом, постройки на переднем плане, непосредственно вдоль береговой линии, отражают разрушения в широтной полосе. В центральной и восточной частях прибрежной полосы (ближе к Босфору) строения (оборонительные и гражданские) несут следы сильных повреждений в виде крупных трещин, оторванных кусков стен, а в одном месте — наклона дома. А вот дальше от берега гражданские дома такого типа повреждений не имеют. Резонно предположить, что прибрежная полоса на востоке испытала более сильные сотрясения, примерно VII–VIII баллов, а внутри города колебания более VII баллов вряд ли происходили.

Всего на гравюре распознаются частичные разрушения 14 или 15 строений. Из них девять — срывы и опрокидывания верхних элементов башен и минаретов. Известно, что верхние части минаретов падают при землетрясениях VIII–IX баллов. Семь разрушенных сооружений падают в одну сторону — к востоку. Поскольку два из них приземистые, невысокие, можно заключить: во-первых, главный толчок был жестким (местным?), а во-вторых, латерально направленным. Считать это случайным воображением художника вряд ли стоит. Данные нарушения можно соотнести с внезапной подвижкой в этой части современного Стамбула по разлому субширотного простираения под южной частью залива Золотой Рог.

В общем, складывается представление, что землетрясение носило локальный характер, интенсивность в городе составила VIII–IX баллов, а в очаге возникла правосторонняя подвижка по местному разлому, простирающемуся с западо-северо-запада на востоко-юго-восток. Все это можно рассматривать как ранний и относительно слабый прообраз следующего события.

Таким же образом разобраны и корректируются параметры других крупных землетрясений — 1509, 1754 и 1766 гг. Анализ материалов по историческим землетрясениям региона за последние 500 лет позволил уточнить пространственно-временное распределение событий на севере Мраморомор-



Рис.8. Стамбул (Константинополь) после землетрясения 10 мая 1556 г. Резьба по дереву, раскрашенная. Изготовлено в Германии.

ского бассейна и четче обозначить промежуточные, давно «молчавшие», подозрительные участки. Стало возможным надежнее определять длительность периодов молчания в разных частях одной и той же ветви разлома, особенно вблизи Стамбула.

Карты макросейсмического поля землетрясений 1999 и 1894 гг. [16, 20] и уточненные очаговые параметры сильных землетрясений 1556 и 1719 гг. в северной части бассейна Мраморного моря принципиально согласуются. Это позволяет выяснить ряд региональных сейсмогеодинамических закономерностей и использовать их для разработки сценариев будущих крупных сейсмических событий в регионе.

Новые знания — новые возможности

В начале XXI в. стремление геологов и сейсмологов к взаимодействию в данном регионе осуществлялось упрощенно: сейсмологи использовали прежние карты разломов, а геологи-тектонисты принимали параметры очагов исторических землетрясений (не однозначные и к тому же без указания возможных ошибок). Соответственно и сеймотектонические построения были слишком приближенными для использования их в прогнозных разработках. В последние годы серьезный прогресс наметился по обоим направлениям. Международные группы исследователей с помощью комплекса современных методов (геофизическое просвечивание, бурение дна, GPS-измерения) значительно уточнили диспозицию разломов и кинематику смещений по ним в акватории (кроме полосы

шельфа на севере), так что теперь обеспечен представительный сейсмотектонический каркас.

Заблаговременно выявленная опасность, мониторинг и международный контроль, открытость сведений — все это дает редкие шансы не только осознать надвигающуюся катастрофу, но и подготовиться к ударам стихии. Возможности сравнительно велики, необходимость — еще больше, а превыше всего — ответственность. Речь идет о мегаполисе (ныне 15.3 млн человек), с массой важнейших объектов, сложной инфраструктурой, экономическими богатствами, уникальными культурными и культовыми памятниками.

В предлагаемом здесь варианте ситуация определяется как более опасная. Но зато видится больше возможностей осуществлять мониторинг, заблаговременно фиксировать возникающие предвестники. Дело в том, что в нашем, северном, варианте очаг располагается не в центре акватории Мраморного моря, а в окружении массивов суши и островов. Именно этот вариант вдольберегового разлома и возникновения на нем очага будущего землетрясения может позволить вести более объемные наблюдения на суше, в гидросфере и атмосфере. Первостепенную роль тут должен сыграть опыт выявления предвестников, полученный при изучении прежних сильных землетрясений (к чему до сих пор не обращались). Между тем в районе, в сходных условиях, часть предвестников начинала обнаруживаться за месяцы и недели. Прослеживать их — задача научно-организационная, вполне выполнимая.

Шансы есть

Кратко резюмируя полученные из разных источников письменные сведения о разрушительных событиях в северной части бассейна Мраморного моря, устанавливаем, что за 500 с небольшим лет Стамбул подвергался сотрясениям интенсивностью VIII–IX баллов шесть-семь раз. При этом очаги сильных событий дважды намечались к западу от него (в 1509 и 1556 гг.), один раз — к юго-востоку (в 1766 г.) и один-два раза — под самим городом (1719, 1754? гг.), остальные располагались

восточнее. Есть основания принимать, что макро-сейсмические поля во всех (в четырех-пяти — надежно) случаях были (суб)широко вытянуты вдоль ветвей Северо-Анатолийского разлома. Последнее землетрясение в августе 1999 г. с эпицентром в 80 км восточнее Стамбула вызвало в нем сотрясения VIII–IX баллов, тогда как в эпицентральной области интенсивность составляла X баллов. Местный очаг в 1719 г. продуцировал землетрясение около IX баллов, а сила землетрясения в 1754 г. определяется в VIII–IX баллов.

Стамбул — город царственный: Византий—Константинополь—Стамбул. Недаром северные соседи (славянские племена) уже с конца первого тысячелетия нашей эры величали его Царьградом. История Града Царствующего на границе Европы и Азии, более того, в узле транспортного пути из Европы в Азию богата событиями как никакая другая. Насыщена она и событиями природными — разрушительными землетрясениями и цунами. Узел судеб исторических оказался на месте узла тектонического, точнее, сейсмотектонического, еще точнее — геодинамического. Сейсмическая угроза мегаполису признана научным сообществом и официально объявлена реальной, неизбежной.

В 1999 г. не только никаких ожиданий не было обнародовано, но случившееся катастрофическое землетрясение к востоку от Стамбула поначалу недооценили по силе и последствиям, так что в первые двое суток экстренных мер не принимали [3]. Сейчас есть шанс если не спасти положение, то значимо ослабить тяжесть последствий.

Какой из намеченных вариантов события «лучше»? Оба крайне скверны по последствиям. Худший, более тяжелый, «лучше» тем, что именно он может заставить предельно мобилизоваться по всем направлениям, в максимальной степени снизить губительные последствия, стать экзаменом высшей категории. Для мирового сообщества это шанс впервые (после удачного китайского опыта 1975 г.) сделать решительный шаг в бесконечной борьбе с неуправляемой подземной стихией. Вероятные сценарии развития очагового процесса разрабатываются. Шансы предусмотреть предстоящий яростный скачок скрытого под землей и водой разлома — Стамбульского монстра — есть. ■

Литература / References

1. Никонов А.А., Ваков А.В., Веселов И.А. Сейсмотектоника и землетрясения зоны сближения Памира и Тянь-Шаня. М., 1983. [Nikonov A.A., Vakov A.V., Veselov I.A. Seismotectonics and earthquakes of the rapprochement zone of Pamir and Tien Shan. Moscow, 1983. (In Russ.)]
2. Никонов А.А. Катастрофа в Турции: неожиданность? Наука в России. 2000; 1: 100–104. [Nikonov A.A. Disaster in Turkey: is it surprise? Science in Russia. 2000; 1: 100–104. (In Russ.)]
3. Barka A. The 17 August 1999 Izmit Earthquake. Science. 1999; 285: 1858–1859.
4. Parson T., Toda S., Ross S. et al. Heightened Odds of Large Earthquake near Istanbul. Science. 2000; 288: 661–665.
5. Wong H.K., Uluğ A., Lüdmann T., Görür N. The Sea of Marmara: a plate boundary sea in an escape tectonic regime. Tectonophysics. 1995. 244(4): 231–250.
6. Flerit F., Armijo R., King G.C.P. et al. Slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart determined from GPS velocity vectors. Geophys. J. Int. 2003; 154: 107.

7. *Armijo R., Pondard N., Meyer B., Uçarkus G.* Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in Istanbul. *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. 2005; 6(6): Q06009. Doi:10.1029/2004GC000896.
8. *Ergintav S., Reilinger R.E., Çakmak R. et al.* Istanbul's earthquake hot spots: Geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap. *Geophysical Research Letters*. 2014; 41(16): 5783–5788. Doi: 10.1002/2014GL060985.
9. *Ambraseys N.N., Finkel C.F.* The Seismicity of Turkey and Adjacent Area. Historical Review, 1500–1800. Istanbul, 1995.
10. *Ambraseys N.N., Jackson J.* Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500. *Geophys. Journ. Int.* 2000; 141: F1–F6.
11. *Ambraseys N.N.* Seismic activity of the Marmara Sea region over the last 2000 years. *Bull. Seismol. Soc. of America*. 2002; 92(1): 1–18.
12. *Eginites D.* Le tremblement de terre de Constantinople. *Ann. de Geographie*. 1895; Janvier(15): 151–165.
13. *Düeck J.* Die Erdbeben von Konstantinopel. *Die Erdbebenwarte*. 1904; 10–12: 177–196.
14. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. Н.В.Кондорская, Н.В.Шебалин (ред.). М., 1977. [New catalog of the strong earthquakes in the territory of the USSR from the most ancient times to 1975. N.V.Kondorskaya, N.V.Shebalin (eds.). Moscow, 1977. (In Russ.)]
15. *Королёва А.О., Никонов А.А.* Малоизвестное разрушительное землетрясение в Мраморном море 10.VII.1894 г.: уточнение параметров по макросейсмическим данным. XVIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов. Нерюнгри. 30 марта — 01 апреля 2017 г. Нерюнгри, 2017; 173–176. [*Koroleva A.O., Nikonov A.A.* A little-known destructive earthquake in the Marmara Sea of July, 1894: specification of parameters on macroseismic data. XVIII All-Russian scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students. Neryungri. March 30 — April 01. Neryungri, 2017; 173–176. (In Russ.)]
16. *Никонов А.А., Королёва А.О.* Разрушительное землетрясение 10.07.1894 г. в Мраморном море: параметризация, вопросы сейсмотектоники, механизм очага и опасности мегаполиса Стамбул. Современная тектонофизика. Материалы 5-й молодежной школы-семинара. М., 2017; 290–297. [*Nikonov A.A., Koroleva A.O.* A destructive earthquake of July 10, 1894 in the Marmara Sea: parameterization, seismotectonics questions, mechanism of the focus and danger of Istanbul. The modern tectonic physics. Materials of the 5th youth workshop. Moscow, 2017; 290–297. (In Russ.)]
17. *Soysal H., Sipabioglu S., Kolcak D., Altinok Y.* Türkiye ve çevresinin tarihsel deprem kataloğu. Istanbul, 1981.
18. *Балакина Л.М., Москвина А.Г.* Северо-Анатолийская сейсмогенная зона (САСЗ). Физика Земли. 2002; (9): 11–28. [*Balakina L.M., Moskvina A.G.* North Anatolian Seismogene Zone (NASZ). *Physics of Earth*. 2002; (9): 11–28. (In Russ.)]
19. *Никонов А.А., Королёва А.О.* Прогноз разрушительного землетрясения в Стамбуле: альтернативные оценки опасности. Материалы 10-й международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков «Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата Геориск — 2018». 23–24 октября 2018 г., Москва. М., 2018. [*Nikonov A.A., Koroleva A.O.* The forecast of a destructive earthquake in Istanbul: alternative estimates of danger. Materials of the 10th international scientific and practical a conference on problems of decrease in natural dangers and risks «The analysis, the forecast and management of natural risks taking into account global climate change Georisk — 2018». On October 23–24, 2018, Moscow. M., 2018. (In Russ.)]
20. Implications for Earthquake Risk in the United State Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17, 1999. Denver, 2000.
21. *Παναζαχου Β., Παναζαχου Κ.* Οι σεισμοί της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη, 1989.

Seismic Hazard to Istanbul Metropolitan Area: Possible Opportunities

A.A.Nikonov

Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS (Moscow, Russia)

Data on the long-term forecast of the strong earthquake in the north of the Sea of Marmara, near the megalopolis of Istanbul are discussed. In 2016 in Turkey the forecast of a destructive earthquake near Istanbul within the next 20–30 years was officially announced. This forecast was based on the results of studying of regional geodynamics and the analysis of data on speeds of lateral shifts in GPS network for the last 20 years. This work presents the alternate localization of the future seismic focus according to the selection of an additional northern alongshore fault, processing primary data on destructive earthquakes in last centuries and taking into account the revealed irregularity in distribution of the modern lateral tectonic movements in different parts of the basin of the Marmara Sea. Possible consequences of the future event for the megalopolis of Istanbul are discussed.

Keywords: forecast of earthquakes, North Anatolian Fault, migration of the seismic focuses, historical earthquakes, Sea of Marmara, Istanbul, GPS measurements.

Черное море: взлеты и падения отечественного рыболовства

Д.Я.Фащук^{1,2}

¹Институт географии РАН (Москва, Россия)

²Институт океанологии имени П.П.Ширшова РАН (Москва, Россия)

Выполнен ретроспективный историко-географический анализ отечественного рыболовства в Черном море. Проанализированы механизмы и установлены хронология и причины смены приоритетных объектов промысла (пелагиды, крупной ставриды, луфаря, скумбрии и нескольких малочисленных, но ценных по вкусовым качествам видов рыб — барабули, кефали, осетровых) во второй половине XX в. Оценено влияние на рыболовство природных и антропогенных изменений условий морской среды в Азово-Черноморском бассейне, ставших причиной последовавшего в 1988–1991 гг. кризиса рыбохозяйственной отрасли и прихода ее в конце 20-го столетия в депрессивное состояние.

Ключевые слова: Черное море, история рыболовства, промысловые виды рыб, география рыбного промысла.

«Вспышки» пелагического хищника — пелагиды

Еще в конце XVIII в. академик П.С.Паллас, совершая поездку по черноморскому побережью, отмечал присутствие в море крупной хищной рыбы семейства скумбриевых — пелагиды (*Sarda sarda*). Внимание к ней как к потенциальному объекту промысла было обращено в 1908–1913 гг. после ее массового появления в прибрежных водах западной, северо-западной и восточной частей моря, а также у побережья Крыма. При этом отмечался катастрофический упадок традиционного промысла скумбрии, что, очевидно, и определило смену промысловых интересов черноморских рыбаков.

Академик Лев Семенович Берг писал: «Весной 1910 г. пелагида появилась во множестве на кавказском побережье моря... она наводнила побережье, массами выбрасывалась на берег, шла на сушку и в пищу. Раньше этой рыбы здесь не ловили, потому что название ее было неизвестно рыбакам» [1].

В 1911 г. в журнале «Вестник рыбопромышленности» сообщалось: «Пелагида изредка встречается в Черном море, но летом 1911 г. в северо-западной части моря она ловилась массами. Из Черного моря пелагида прошла в Азовское, где ловилась в изобилии».

В послереволюционный период пелагида заняла первое место в черноморском рыболовстве по запасам и ценности. Это было связано с ее массовыми заходами в море в 1922–1923 и 1933–1934 гг.

Многочисленные последующие исследования подтвердили ежегодное периодическое присутствие пелагиды в Черном море.

По данным турецких исследователей известно, что в первой половине XX в. пелагида обычно в конце апреля мигрировала для нереста и нагула из Мраморного моря в Черное. При этом вспышки численности (массовые заходы) пелагиды в Черном море совпадали по времени с периодами увеличения ее количества и объемов добычи в проливе Босфор [2].

Результаты авиаразведок, проведенных с апреля по август 1939 г., показали, что в марте—апреле пелагида начинает двигаться от Босфора вдоль берегов Болгарии и через открытую западную и восточную части моря в сторону северо-западного шельфа и Крыма, образуя огромные скопления нересто-



Пелагида — черноморский хищник.

Здесь и далее фотографии предоставлены автором

Окончание. Начало см. в №8.

© Фащук Д.Я., 2018

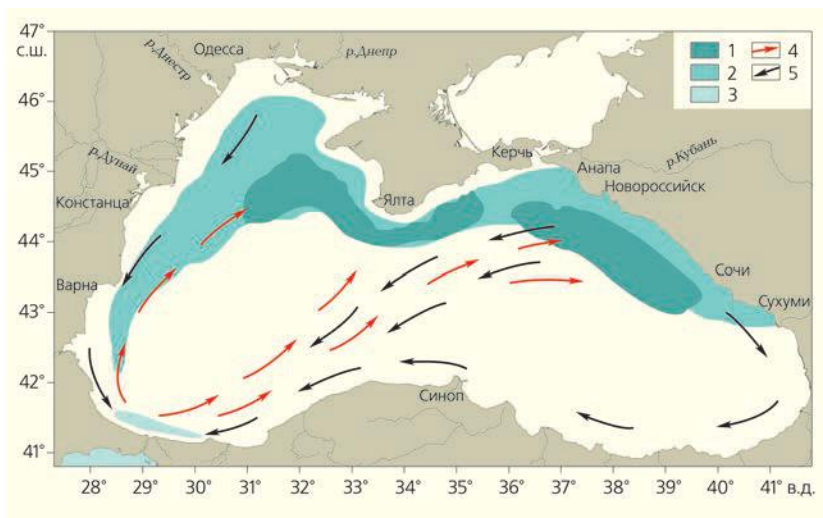


Схема жизненного цикла пелагиды в Черном море [3]: 1 — нерест; 2 — нагул; 3 — зимовка; 4, 5 — весенние и осенние миграции.

вого характера в 30–50 милях от берегов Северного Кавказа (Туапсе, Новороссийск) и Крыма (мысы Меганом и Сарыч) [4]. По мере движения к крымскому берегу скопление разрезается и распадается на отдельные косяки — рыба переходит на усиленное питание (нагул). К началу июня пелагида распределяется в северо-западной, северной и северо-восточной частях Черного моря. Нерест проходит с конца мая по середине июля.

Осенью рыба отходит от берега и начинает двигаться в обратном направлении — на юг, к месту зимовки, в Мраморное и Эгейское моря. При этом в мае через Босфор проходила крупная рыба, а с сентября по ноябрь Черное море покидают взрослые особи вместе с сеголетками. В Турции крупная пелагида носит название *торик*, а в Болгарии — *турук*. Мелкую пелагиду, длина которой не превышает 40 см, а вес — 500 г, турецкие рыбаки называют *паламуд*. На Стамбульском рыбном рынке пелагида тщательно сортировалась. Особи, заходившие весной в Черном море для летнего нагула, ценились значительно дороже, чем *отлики* — «дезертиры», остававшиеся летом в Босфоре и Мраморном море.

В 1934–1935 гг. в весенний период Турция добывала около 10 тыс. т пелагиды. Промысловые успехи советских рыбаков были значительно скромнее. Летом 1935 г. пелагиду стали ловить кошельковыми неводами на удалении от берега. В первый год добычи на северо-западном шельфе Черного моря два сейнера с двигателями мощностью 50 л.с. за полтора месяца работы выловили всего 66 т. На следующий год улов здесь был немного больше — 88 т. В сумме по всему району выловили 168,8 т, хотя планировали добыть 1000 т.

После обнаружений с самолета в 1937–1939 гг. огромных промысловых скоплений пелагиды в Черном море Народный комиссариат рыбной

промышленности СССР организовал специальную экспедицию для изучения биологии и освоения промышленного лова этой рыбы. Оказалось, что она собирается в глубоководных открытых районах моря, перемещается с большой скоростью, быстро замечает любые орудия лова и уходит от обмета кошельковым неводом, подныривая под него. Стало ясно, что отечественный рыбодобывающий флот пока не готов к добыче пелагиды. Несмотря на авиационную оценку запаса пелагиды в количестве 540 тыс. т (!), промысловых уловов в 1939 и 1940 гг. получено не было.

В 1954–1957 гг. состоялся очередной, четвертый с начала XX в., массовый заход пелагиды

в Черное море. К этому времени в нашей стране уже были построены новые быстроходные рыболовецкие суда с двигателями мощностью 150 л.с. и усовершенствованы орудия лова. Это позволило организовать эффективный промышленный лов ценного мигранта.

Советский промысел пелагиды в период послевоенной вспышки ее численности начинался в мае, активно велся в июне и продолжался до конца ноября [3]. В конце октября — начале ноября 1955 г. плотные скопления пелагиды, мигрирующие в сторону Босфора, были впервые обнаружены с воздуха между мысами Караборун и Бяла (в 20 милях к северо-западу от Босфора) на расстоянии нескольких десятков миль от берега. Уловы за один замет кошелька достигли 16 т. Уже в 1956 г. советские рыбаки добывали 23,5 т, а в 1957 г. — 28 т за один замет. В 1957 г. с мая по октябрь в промысле пелагиды участвовало около 140 рыболовных судов, средний улов на судно составил 5,4 т, а у 40 бригад эта цифра изменялась от 6,3 до 9,6 т. В том году было выловлено рекордное количество пелагиды — 8,5 тыс. т (табл.1).

В 1958 г. пелагида появилась в Черном море в последних числах апреля. В конце мая на участке от Туапсе до Ялты как в прибрежной зоне, так и на удалении до 100 миль от берега пелагиду ловили 150 судов, добывая в отдельных случаях до 15 т рыбы за один замет. В июне рыба облавливалась

Таблица 1
Уловы пелагиды в Черном море (тыс. т) [5]

Страна	Годы					
	1954	1955	1956	1957	1958	1959
СССР	0.25	1.53	5.56	8.5	4.18	0.2
Болгария	2.19	0.98	1.07	0.98	0.49	—

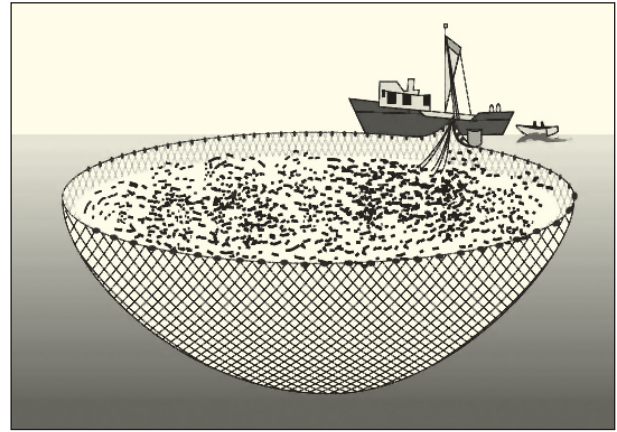
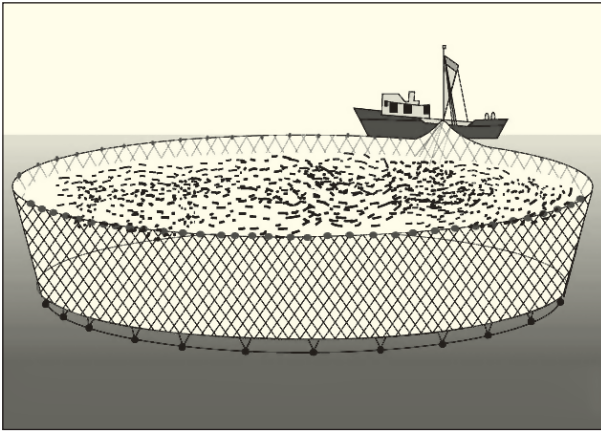


Схема работы кошелькового невода.

у побережья Крыма (мыс Меганом) на удалении 20–80 миль от берега и в районе Кавказа (Утриш и Джубга) в 10–12 мильной прибрежной зоне. В 1958 г. было выловлено 4,2 тыс. т пелагиды, а в 1959 г. с мая по декабрь добыто всего 200 т.

В конце октября пелагида начинала стремительное движение на юг вдоль западных берегов Черного моря. При этом между мысами Калиакра и Эмине к ней присоединялись косяки молоди, родившейся и нагуливавшейся в районе Севастополя. В зависимости от направления ветра путь осенней миграции этой части популяции пелагиды лежал вблизи берега (при южных и юго-восточных ветрах) или на удалении от него (при западных и северных).

В высокоурожайные годы молодь пелагиды, родившаяся и нагуливавшаяся у берегов Крыма, мигрировала к Босфору, пересекая открытое море. При этом рыба из восточной части Черного моря возвращалась в Босфор по пути весенних миграций вдоль восточного и южного побережья. Массовый заход в Босфор происходил обычно в конце октября. Точных данных о запасах пелагиды в те годы нет, но, согласно оценкам болгарских ученых, ее количество могло достигать 200 тыс. т.

На протяжении всего периода вспяшки численности пелагиды в Черном море средняя



Мыс Эмине — юг побережья Болгарии. Вид с суши (вверху) и с моря.



Мыс Калиакра — север побережья Болгарии.

длина тела рыб, участвовавших в промысле, постоянно возрастала. В 1955 г. она составила 44.5 см, в 1956 г. выросла до 52.5 см, в 1957 г. — до 58.5 см, а в 1958 г. достигла 66 см. После анализа возрастного состава уловов 1955–1958 гг. было высказано предположение, что «вспышка пелагиды» во второй половине XX в. обусловлена заходом в Черное море рыбы высокоурожайного поколения 1954 г. Весной 1955 г. годовалые пелагиды в массовом количестве зашли в море и составили основу нерестового стада, на котором базировался промысел в течение последующих четырех-пяти лет [6].

С 1960 г. в территориальных водах СССР промысел пелагиды не велся, так как она стала встречаться лишь в единичных экземплярах. С того времени больше не наблюдалось прежних высокоурожайных поколений этой рыбы. Ее нагул обеспечивался кормовой базой анатолийского побережья Турции, и миграции в северные районы моря прекратились. Турция же продолжала добывать пелагиду в количестве от 28 тыс. (1966–1970) до 15 тыс. т/год (1980) [7].

Крупная черноморская ставрида

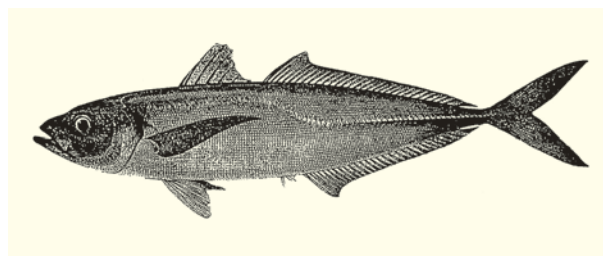
В начале XX в. многие исследователи природы Черного моря в своих трудах упоминали о наличии у берегов Кавказа и в западной части моря крупной ставриды (*Trachurus mediterraneus ponticus*). В мае 1906 г. у берегов Болгарии было поймано 3800 особей ставриды длиной от 20 до 30–40 см. В июне болгарские рыбаки добыли еще 16 тыс. таких рыб. Суммарный вес улова превысил 10 т [8].

О крупной ставриде черноморские рыбаки «вспомнили» только через 40 лет. В 1946 г. в прибрежной зоне Кавказа (Батуми) авиаразведка впервые обнаружила промысловые скопления этой рыбы, нагуливающейся на мелководье. Вес-

ной 1950 г. косяки *ходовой*, движущейся на северо-запад, крупной ставриды были обнаружены с воздуха уже в открытом море, на удалении 40–70 миль от кавказского побережья. В течение последующих двух лет рыба весной и в начале лета появлялась у берегов Крыма и Северного Кавказа, в конце июля — начале августа уходила из этих районов, а в конце августа — начале сентября возвращалась в район Батуми—Поти. В 1953–1960 гг. крупная ставрида стала основным объектом промысла советских рыбаков в открытых районах Черного моря [9].

Первые исследователи, занимавшиеся феноменом новых промысловых скоплений крупной ставриды в Черном море, считали ее средиземноморским иммигрантом и потому называли средиземноморской [10]. Однако в дальнейшем никаких морфологических отличий между мелкой и крупной ставридой Черного моря так и не обнаружилось. Это дало основание отнести обеих к одному виду и объяснить появление нового объекта промысла резким увеличением численности старших (10–12 лет) возрастных групп черноморской ставриды в начале 1950-х годов.

Такое стремительное изменение возрастной структуры популяции специалисты связали с одновременным появлением пелагиды. Дело в том, что пелагида быстро растет, в годовалом возрасте она уже достигает в длину 35–40 см и весит около килограмма. К четырем-пяти годам рыба вырастает до 65–70 см и набирает до 3.5–4 кг. Крупная же ставрида растет медленнее: даже в 9–10 лет ее длина составляет всего 40–45 см, а вес — около 1.2 кг. Кроме того, исследования конца 1950-х годов показали, что, в отличие от крупной ставриды, пелагида имеет широко раскрытую пасть с острыми, загнутыми назад зубами [11]. Таким образом, пелагида становится хищником уже в первые месяцы жизни и способна уничтожить одновозра-



Крупная черноморская ставрида (длина 47.5 см). Черное море, Балаклава [12].

Рисунок Ю.Г.Алеева

стную молодь ставриды размером до 17 см. Ученые сделали вывод, что молодь южного стада в 1953–1956 гг. была начисто съедена пелагидой. В уловах 1957 г. молодая ставрида (размером до 32 см) полностью отсутствовала, а основу добычи составили особи старшего возраста.

В дальнейшем крупная ставрида была отнесена к отдельному южному стаду, обитающему исключительно в Черном море. Мелкая ставрида живет в трех других стадах: юго-западном (босфорском), северном (крымском) и восточном (кавказском). В них максимальная длина рыб старших возрастов — восьми-, пяти- и трехлеток — не превышает 29,5, 24,8 и 19,0 см соответственно. Рыбы же южного стада достигают половозрелости к трем-четырем годам, их средняя длина более 22 см, а максимальная — 47 см.

Ареалы трех стад мелкой ставриды практически не пересекаются, в то время как ареал крупной в значительной степени их перекрывает. Кроме того, ставрида южного стада значительно меньше привязана к шельфу и совершает более протяженные миграции. Весной и летом она встречается не только в прибрежной зоне, но и в открытом море, на удалении 70–100 миль от берега. Зимует в юго-восточной части моря южнее мыса Кодор, а также у анатолийского берега — до мыса Киремит.

Весной часть рыбы южного стада мигрирует для нереста к западу вдоль турецкого берега через прибосфорский район к побережью Болгарии и Крыма. Другая часть в то же время (апрель и первая половина мая) при прогреве воды до 9°C перемещается на востоко-северо-восток к берегам Аджарии, Северного Кавказа и далее на северо-запад к Крыму, задерживаясь надолго на скоплениях хамсы для интенсивного питания. При этом в годы высокой численности в конце мая и начале июня крупная ставрида достигала побережья Сочи и Туапсе, в течение июня проходила вдоль берегов Новороссийска и Анапы до мыса Меганом, а в июле достигала южных берегов Крыма,

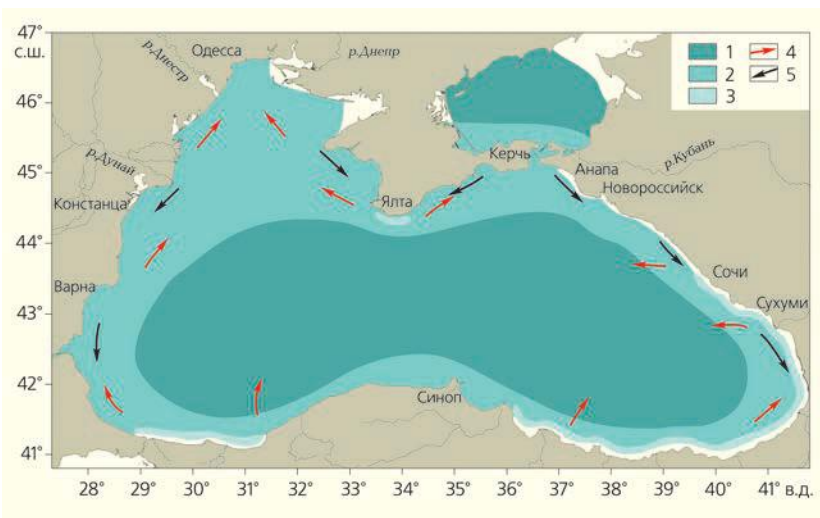


Схема жизненного цикла мелкой черноморской ставриды [7]: 1 — нерест; 2 — нагул; 3 — зимовка; 4, 5 — весенние и осенние миграции.

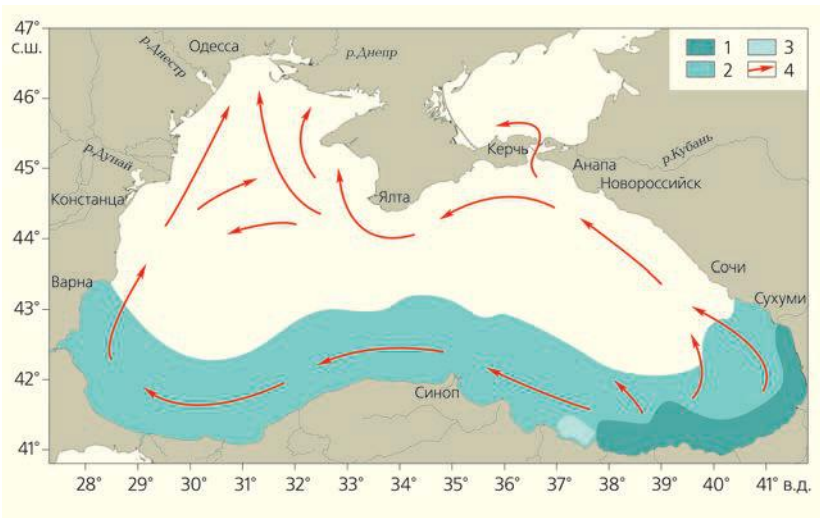


Схема жизненного цикла крупной ставриды южного стада в Черном море [12]: 1 — места зимовки установленные; 2 — основной ареал в летний период; 3 — места зимовки предполагаемые; 4 — весенние нерестовые миграции.

Каркинитского и Тендровского заливов, доходя иногда до Одессы.

В результате активного промысла только за август–сентябрь 1953 г. в районе Батуми объем добычи крупной ставриды в 2,6 раза превысил среднегодовой вылов в период 1945–1951 гг. (табл.2).

Таблица 2
Уловы ставриды в Черном море (тыс. т) [13]

Ставрида	Годы									
	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962
Крупная	0.5	10.5	11.3	15.2	12.3	3.9	3.7	4.8	3.2	1.2
Мелкая	1.79	1.6	0.5	0.2	0.2	0.2	2.1	6.24	4.03	12.45

С 1953 по 1955 г. годовая добыча увеличилась с 0,5 до 11,3 тыс. т. В 1956 г. она превысила 15 тыс. т. При этом отдельные заметы кошелькового невода приносили до 40–50 т рыбы.

Длина тела добываемых рыб колебалась от 32 до 47 см, а их средний вес составлял 730 г. Встречались особи длиной до 55 см и весом 1,2 кг. В период пика добычи (1954–1955) в Советском Союзе ежегодно вылавливалось 10–15 тыс. т ставриды, а суммарная добыча за 1953–1963 гг. достигла 70 тыс. т.

Активный промысел крупной ставриды длился всего несколько лет. Пик ее численности и, соответственно, максимальная добыча пришлись на 1953–1957 гг. Уже в 1958 г. добыча снизилась почти в четыре раза — с 15 до 4 тыс. т. В 1962 г. отечественные рыбаки поймали всего 1,2 тыс. т. После этого времени крупная ставрида стала встречаться в уловах промысловых судов только единично.

Сокращение запасов крупной ставриды объясняется тем, что к началу 1960-х годов в результате естественной смертности, выедания хищной пеламидой и ежегодного вылова численность урожайных поколений 1946–1949 гг. сошла на нет. После ухода из Черного моря пеламид популяция ставриды южного стада также оказалась подорванной и утратила промысловое значение для российских территориальных вод.

Промысел луфаря

Луфарь (*Pomatomus saltatrix*) — стайная хищная пелагическая рыба семейства окунеобразных. Обитает в толще воды преимущественно в открытых районах моря. Вблизи берегов появляется только в теплое время года. Половой зрелости достигает в возрасте 2–4 лет. Зимует в Мраморном и Средиземном морях, весной заходит через Босфор в Черное море для нереста и нагула. Икру мечет летом, обычно на открытых участках моря. Личинки и молодь обитают в поверхностном слое прибрежной зоны моря, на удалении до 160 км от берега, в основном в водах Грузии. Молодь луфаря рано переходит на хищный образ жизни. Мальки размером 8–10 см уже питаются мелкой рыбой (шпротом, хамсой, ставридой) и креветками.

До 1970-х годов миграции луфаря из Босфора были направлены вдоль берега в северо-западную часть моря, затем к побережью Крыма и Керченскому предпроливью. Часть популяции следовала в район массового нереста и нагула восточным путем —



Луфарь.

вдоль южного (Турция) и восточного (Грузия, Северный Кавказ) побережья моря, а часть — напрямую от берегов Турции через открытое море.

Осенью сеголетки и взрослые особи перемещаются обратно к Босфору и Мраморному морю. При этом считается, что часть популяции остается на зиму у берегов Кавказа и Анатолии [7]. В урожайные 1967–1969 гг. фиксировались массовые заходы луфаря в Керченский пролив и южную часть Азовского моря, где его интенсивно облавливали ставными, закидными и кошельковыми неводами. Запас молоди луфаря в это время оценивался в 6 тыс. т. В этот же период отмечены максимальные уловы СССР — 944 т/год при среднем количестве 584 т/год. Турция при этом добывала от 3 до 6,5 тыс. т/год.

После 1971 г. заходы луфаря в северную часть Черного моря прекратились. Уловы в нашей стране к 1980 г. снизились почти до нуля, а в 1981 г. в территориальных водах СССР и России попадались только отдельные экземпляры молоди. У побережья Турции к 1980 г. добыча луфаря, напротив, увеличилась до 10–15 тыс. т/год и сохранялась на этом уровне до 1990-х годов и в течение 1993–2002 гг.

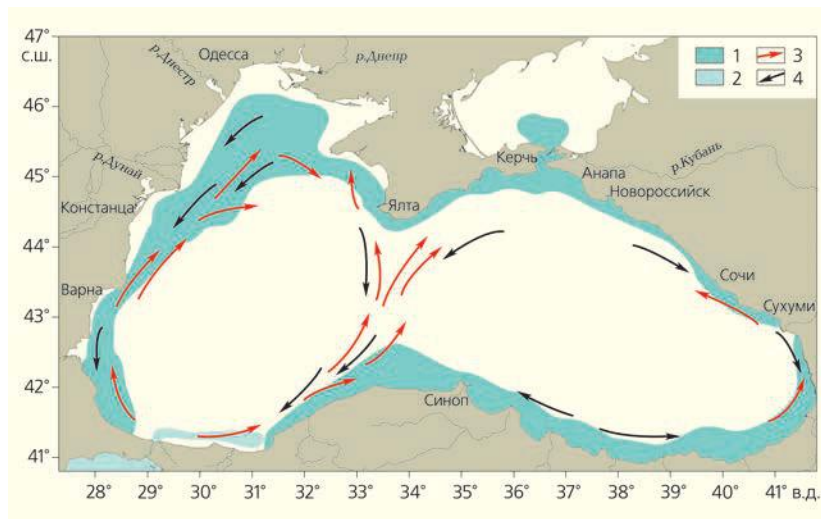


Схема жизненного цикла луфаря [7]: 1 — нерест и нагул; 2 — зимовка; 3, 4 — весенние и осенние миграции.

Согласно существующим гипотезам, причины сокращения численности луфаря в северной части Черного моря заключаются в отсутствии урожайных поколений после 1970 г. Кроме того, исследователи не исключают вероятность гибели рыбы на ранних стадиях развития по причине увеличившегося уровня нефтяного и химического загрязнения поверхностных вод. Заходящая весной через Босфор часть популяции теперь не поднимается, как ранее, в северные районы Черного моря, а предпочитает нереститься и нагуливаться вдоль турецкого побережья.

Грустная история черноморской «качалки»

С незапамятных времен традиционным объектом рыболовства в Черном море была скумбрия (*Scomber scombrus*) — пелагическая планктоноядная рыба семейства скумбриевых. Ее добывали у берегов Крыма и на северо-западном шельфе после появления у России выхода к Черному морю. Лов скумбрии продолжался с XIX в. вплоть до 1971 г. ставными, закидными и кошельковыми неводами.

В конце XIX в. добыча велась на всем побережье северо-западной части моря, где в то время насчитывалось от 69 до 84 заводов. Ловили скумбрию и с лодок — простыми морскими неводами с мая по октябрь. В один невод попадалось до 100 тыс. штук. Бочка высотой в аршин (72 см) и диаметром в 11 вершков (около 50 см) вмещала 4–5 тыс. штук мелких, до 3 тыс. средних или 1.1–1.4 тыс. крупных рыбин.

Косяки скумбрии держались в верхних слоях воды, часто у поверхности, издавая характерный шум. За это рыбаки называли крупную скумбрию (30–32 см) *баламутом*. Звали ее и *качалкой* — из-за того что по форме рыба напоминает круглую качалку для раскатывания теста. Далее по мере снижения длины рыбы выделялись сеголетки: *чирусы* (до 16.5 см), *чибрики* (до 12 см) и *гвозди* (до 10 см).

Изучение промысла скумбрии, особенностей ее поведения, условий и районов образования промысловых скоплений началось только после 1917 г., когда в Одессе открылось отделение Украинской научной рыбохозяйственной станции. Было установлено, что скумбрия живет три-четыре года, половой зрелости достигает на первом году жизни при длине 16.5 см, а максимальная масса тела взрослой особи составляет 170–200 г. Есть сведения, что однажды попался экземпляр длиной 48 см и массой 450 г. Зимует и нерестится



Скумбрия.

скумбрия в Мраморном море (февраль—март) в воде с соленостью 30‰. Икра отличается низкой плавучестью и даже в соленой воде парит — в основном на глубине 30–40 м, не поднимаясь выше. В черноморской воде икра скумбрии плавать не может, поэтому рыба здесь не нерестится.

Отнерестившиеся особи в конце марта — начале апреля направляются для нагула через Босфор в богатое кормом Черное море и следуют вдоль берегов Болгарии и Румынии к Одессе — в мелководную северо-западную часть моря и далее к мысу Тарханкут и к Евпатории.

Первые экземпляры скумбрии появлялись в районе Одесского залива иногда в апреле, но чаще во второй половине мая. В конце июля и в августе к взрослым рыбам присоединялись чирусы возрастом 4–6 мес. При их большой численности к концу лета скумбрия доходила до берегов Крыма и Керченского пролива. Массовый ход на север

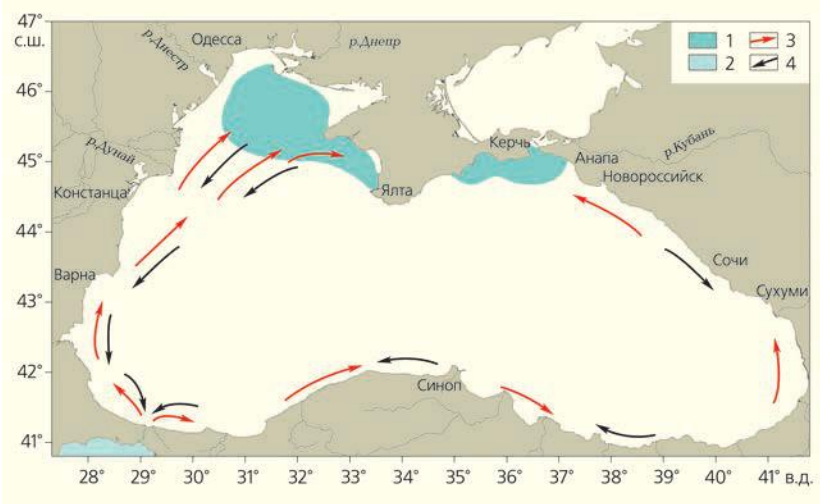


Схема жизненного цикла скумбрии в Черном море [7]: 1 — нагул; 2 — нерест, зимовка; 3, 4 — весенние и осенние миграции.



Скалы мыса Тарханкут в северо-западной части Черного моря.

Фото М.Волкова

моря продолжался с апреля по июль, причем основная масса мигрирующих стай шла вдоль болгарских и румынских берегов, а оставшаяся часть — вдоль берегов Анатолии и Кавказа.

В сентябре—октябре плотные косяки нагульной скумбрии скапливались в черноморском устье Керченского пролива, в зоне массовой миграции азовской хамсы. В октябре—декабре (при мягкой зиме — в январе), после понижения температуры воды до 8–10°C, скумбрия отправлялась обратно — на зимовку в Босфор и Мраморное море.

В течение всего периода пребывания в Черном море основные скопления скумбрии отмечались у побережья Болгарии (с конца апреля до начала июня и с начала октября до середины декабря), у берегов СССР (с середины июня до начала октября) и в турецких водах возле Босфора (в апреле—мае и ноябре—январе). В 1920–1930-х годах скумбрия успешно ловили не только в водах нашей страны. В Турции вылов превышал 3,7 тыс. т/год, в Болгарии, где эта рыба пребывает очень короткое время в момент миграции из Босфора в Черное море, — 1,3 тыс. т/год, а в Румынии — 100 т/год.

Несмотря на то что в дореволюционное время промысел скумбрии велся по всем берегам Черного моря, максимального развития он достигал в северо-западной мелководной части. Массовые подходы рыбы к берегу здесь наблюдались с начала июня. В течение лета и осенью, вплоть до октября, скумбрия образовывала плотные промысловые скопления в местах нагула — вдоль берега от взморья Днестра до Тендровской косы (приустьевое района Днепра). До 1915 г. основными орудиями лова здесь были кефалевые заводы и *скипасти* — мешки на кольях (*казаны*), разделенные стенкой (*дорогой*), которую закрепляли на берегу. В 1908 г. из 1 771 600 руб., полученных

в нашей стране от рыболовства в этом районе, промысел скумбрии принес 1 123 500 руб. (65%).

В 1908–1913 гг. в прибрежных водах сначала в восточной части Черного моря, а затем в районе Одессы и на побережье Крыма был отмечен катастрофический упадок традиционного промысла скумбрии. Этот кризис длился пять лет, и, так же как в случае со ставридой, по времени он совпал с массовым вторжением хищной пелагиды, активно питавшейся молодью скумбрии.

В 1928–1929 гг. на северо-западном шельфе моря было выловлено 600 т скумбрии. Исследователи отмечали, что советский промысел скумбрии в послереволюционный период по сравнению с турецким и болгарским «развит совершенно недостаточно» [14].

В то время годовой улов в водах Украинской ССР был в 40–50 раз ниже турецкого. Но уже в 1931 г. в водах северо-западного шельфа поймали 2,2 тыс. т скумбрии — 12% суммарного улова в этом районе моря и во впадающих в него реках.

В середине 1930-х годов промысловая разведка в отдельных районах северо-западного шельфа вдали от берега (на глубинах 16–20 м) обнаружила промысловые скопления скумбрии «на всем протяжении видимости бинокля» [15]. Они неоднократно фиксировались и в открытом море, а также вдоль побережья Крыма, но промысел был невозможен из-за отсутствия технологии лова на больших глубинах, где прибрежные орудия (ставные невода, обкидные сети) неприменимы. Первые экспериментальные обловы кошельковым неводом начались только в 1935 г.

После окончания Великой Отечественной войны и в 1950–1970-х годах лов скумбрии кошельковыми, ставными и закидными неводами продолжался. При этом с 1961 по 1970 г. уловы всех черноморских стран существенно менялись по причине периодического выедания скумбрии луфарем и пелагидой. Установленная обратная связь между уловами скумбрии и хищников подтверждает это заключение. Периоды массовых всплесков численности хищников случались и в прежние годы, причем не только у побережья нашей страны, но и в водах Болгарии — в 1892–1894, 1910–1914, 1935–1939 и 1955–1958 гг. [7].

В 1961–1965 г. общий вылов скумбрии всеми черноморскими странами составлял 9,8 тыс. т/год. Болгария добывала в среднем 819 т/год (от 358 до 1971), Румыния — 124 т/год (57–143), СССР — 2412 т/год (1610–3240), а Турция — 6460 т/год (4900–9600). Но уже в 1966–1970 гг. общий вылов

сократился в пять раз, уловы Болгарии, Румынии и СССР — на порядок, а Турции — в четыре раза.

Снижение уловов скумбрии вновь совпало по времени с увеличением стада луфаря после высокоурожайных поколений 1965 и 1966 гг. Запасы скумбрии в 1957–1968 гг. оценивались в 22–25 тыс. т. После 1970 г. они уменьшились в 100 раз. Начиная с 1971 г. скумбрию ловили по 100–300 т/год только в водах Турции. В северных районах Черного моря с тех пор рыба не появлялась...

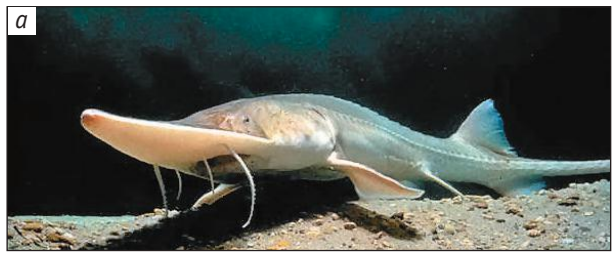
Финал тысячелетнего черноморского «краснолова»

Античный историк и географ Страбон в своем знаменитом труде «География» при описании Боспорского государства, занимавшего с 480 г. до н.э. по VI в. территории Восточного Крыма, Таманского п-ова и Нижнего Придонья, сообщал о добыче в Боспоре Киммерийском (Керченском проливе) «больших рыб без позвоночника» размером с дельфина — осетровых. Эти рыбы в Античные времена были предметом гордости и элитного государственного экспорта, в среде греческих аристократов они считались дорогим деликатесным продуктом.

При раскопках Пантикапея — столицы Боспорского государства — из общего количества обнаруженных рыбных останков значительная часть принадлежала осетровым, причем севрюга составляла 12.8%, осетр — 10.2%, стерлядь — 7.7%, шип — 2.6%. Среди «рыбных артефактов» из древнегреческого города Китея (V–I вв. до н.э.) на Керченском п-ове число осетровых рыб значительно преобладало над створками моллюсков и позвоночниками дельфинов. При изучении аналогичных находок из Ольвии (VI–IV вв. до н.э.) — греческой колонии на правом берегу Днепо-Бугского лимана — оказалось, что здесь уже 61.7% составляли останки осетровых рыб. В Елизаветинском городище в устье Кубани удельный вес осетровых в древних уловах достигал 90%, из этих рыб 21% составляли осетры, а 79% — севрюга. Наконец, в останках рыб из раскопок древнегреческой Фанагории (IV–III вв. до н.э.) на таманском берегу Керченского пролива осетры составляли 22.2%, севрюга — 30.8%, а в древнем городище Танаис (II–I вв. до н.э.) в дельте Дона 16.3% рыбных останков принадлежали осетрам, 9.9% — севрюге и 6.4% — стерляди [16].

Таким образом, не вызывает сомнений тот факт, что осетровые с древних времен были типичными обитателями и объектами промысла в Черном и Азовском морях.

В XX в. представители осетровых рыб встречались в Черном море практически повсеместно в диапазоне глубин от 20 до 110 м. При этом 99% промыслового объема принадлежало *западной* популяции, сосредоточенной в Каркинитском заливе северо-западной части моря. Основным местом нереста было нижнее течение Днепра, Днестра



Осетровые Черного моря: севрюга (а), белуга (б), шип (в) и осетры — атлантический (з) и русский (д).

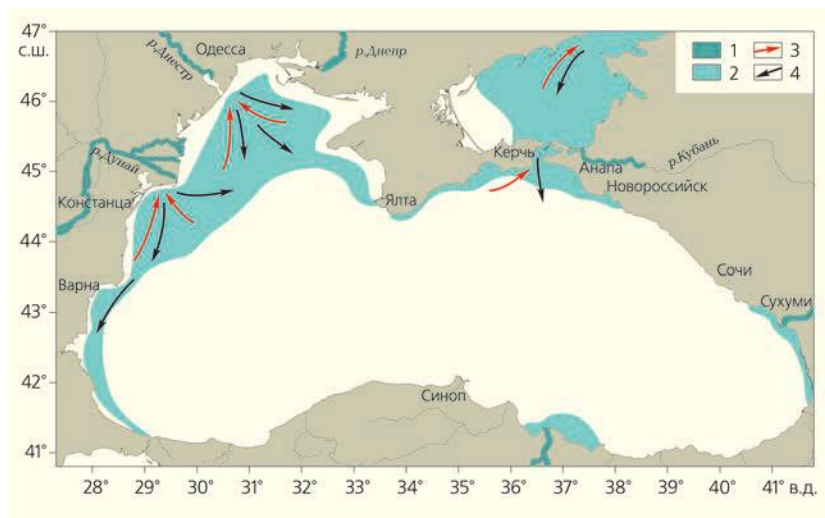


Схема жизненного цикла осетровых рыб в Черном и Азовском морях [7]: 1 — нерест в реках; 2 — нагул на шельфе; 3, 4 — весенние и осенние миграции.

(с конца марта до начала июня) и Дуная (с февраля до конца апреля и с сентября до начала января). Значительно менее крупная (1%) *восточная* популяция обитала в юго-восточной части моря, у побережья Грузии, используя для нереста (с конца мая по август—сентябрь) взморье (100–120 км от устья) рек Риони, Кодори, Ингури и др.

По странному дипломатическим обстоятельствам после Крымской войны воды взморья Дуная в районе Вилково (от северной протоки — Гусиного Дуная до Георгиевского гирла) оказались под властью Турции. Теперь благодаря турецкой статистике мы точно знаем, что, например, в 1866 г. здесь было поймано 27 тыс. пудов (442 т) белуги и 137 тыс. штук крупной сельди. Уже упоминавшийся купец Широков в 1843 г. поймал в своих владениях 26 тыс. пудов (426 т) белуги, 3 тыс. пудов (49 т) осетра и 400 пудов (6,5 т) севрюги.

В начале XX в. в царской России *краснолов* (добыча осетровых) весьма активно велся у берегов Крыма. Только в 1904 г. в районе Феодосии было выловлено около 525 т белуги, а всего в тот год в крымских водах ее поймано около 1000 т. Однако уже в те годы появились первые предвестники будущей беды. По сравнению с 1860-ми годами российский крючной промысел осетровых, например, в районе Керчи сократился в 4–6 раз. Вылов красной рыбы к началу Первой мировой войны не превышал здесь 10 тыс. пудов/год (163,8 т), а производство икры — 400 пудов/год. Добыча снизилась из-за «широко развитого бесконтрольного красноловного промысла в Азовском море» [17].

В начале 1950-х годов в связи с увеличением интенсивности промысла осетровых аханами* их

* Ахан — ставная сеть для ловли осетровых рыб, устанавливаемая в притопленном виде на приустьевых участках моря «отвесно к берегу» в период хода рыбы на нерест.

добыча в северо-западной части Черного моря увеличилась с довоенного количества (317 т/год) до уровня начала века и составила 1250–1310 г/год. Только в 1953 г. месячные уловы в Днепре, его лиманах и в море на участке от Тилигульского лимана до Каркинитского залива достигали 452 т. Тем не менее рост добычи осетровых в 1950-х годах на северо-западном шельфе продлился недолго. После начала гидротехнического строительства на Днепре и в низовьях Дуная запасы этой ценной рыбы резко сократились. Подавляющее большинство днепровских нерестилищ находились выше построенной в 1955 г. Каховской ГЭС. После возведения плотины интенсивность и эф-

фективность нереста осетровых резко сократились. Рыба метала икру на значительно меньшей площади и в менее благоприятных условиях — у плотины, ниже с.Львова, а также у г.Новой Каховки. В 1962 г. уловы осетровых в этом районе моря снизились до 80 т, в 1963 г. составили 130 т, в 1964 — всего 100 т. В 1980 г. в СССР и Турции осетровых ловили по 7 т, в Болгарии и Румынии продолжали добывать по 30–40 т [7], а общий запас осетровых в Черном море в конце XX в. оценивался в 9 тыс. т.

На восточном шельфе Черного моря в конце XIX в. также добывали осетровых — в реках Риони, Хопи, Ингури и на их взморье. В феврале—марте начинали ловить белугу на крючья — 70 крючьев крепились на расстоянии 12 вершков (53 см) друг от друга на одном перемете. С апреля шли шип и севрюга, а около середины мая появлялся осетр (в основном атлантический — *Acipenser sturio*). Всего за сезон около 400 человек выставляли до 40 тыс. крючьев. Каждые 5 тыс. приносили в среднем 30 пудов (491 кг) икры, суммарный годовой улов составлял 250 пудов (4 т) икры и 3–4 тыс. пудов (до 65 т) красной рыбы.

В 1950–1960 гг. вылов осетровых в юго-восточной части Черного моря сократился по сравнению с периодом 1931–1939 гг. почти на порядок, а по сравнению с уровнем начала века — на два порядка и колебался в пределах от 5,7 до 30 т/год. В 1964 г. в водах Грузии ловили всего 6,7 т. К началу 1970-х годов в результате активного промысла и начавшейся «индустриализации» рек (строительство каскада ГЭС «Варцихе» на Риони и ГЭС на Ингури) осетровые в этом районе моря потеряли свое промысловое значение. В 1967 г. их промысел в Риони (от устья до нерестилищ) и в пятимильной зоне моря между портами Поти и Очамчиры был запрещен.

В начале 1970-х годов, несмотря на потерю промыслового значения, численность стада атлантического осетра в Риони, по оценкам грузинских ихтиологов, была еще достаточной для естественного воспроизводства и обеспечения рыбоводного завода половозрелыми производителями. В 1975 г. количество осетровых в этом районе оценивалось в 76 тыс. экземпляров, более 70% из которых составлял атлантический осетр. На этом основании на Риони запланировали строительство осетрового завода за счет средств Министерства энергетики и электрификации СССР (в качестве компенсации рыбному хозяйству региона). Строительство это, однако, затянулось на долгие годы.

Для восстановления запасов осетровых в 1959 г. построили Днестровский осетровый рыбноводный завод — первый в бассейне Черного моря. В 1961 г. на Всесоюзном совещании по вопросам развития осетрового хозяйства в водоемах СССР было принято решение о необходимости создания вблизи устья Дуная, в районе Килийского рукава его дельты, еще одного крупного завода — с ежегодной мощностью в 3 млн мальков. В то же время Управление рыбной промышленностью Херсонского совета народного хозяйства решило строить осетровый рыбноводный завод в Цюрупинске. Тем не менее даже первый, Днестровский, завод в конце 1960-х годов не использовался по прямому назначению из-за отсутствия достаточного количества производителей (маточного стада). По той же причине строительство заводов на Днепре и Дунае к концу 1960-х так и не началось.

В начале 1990-х годов, после распада СССР и в период экономического кризиса, в российских водах широко развился браконьерский промысел ценных рыб, причем велся он как российскими, так и иностранными рыбаками.

Официальной статистики неучтенных уловов проходных, полупроходных и пресноводных рыб не существует. Но по косвенным данным специалисты Азовского НИИ рыбного хозяйства оценивают масштаб незаконного лова в Азовском море, например в 1996 г., осетра и севрюги в 4800 и более 1000 т соответственно [18]. При этом их официальный вылов в тот год составил 413 и 181 т (!). В 1995 г. объем браконьерской добычи севрюги был выше легального в три, а осетра — почти в 10 раз.

К 2000 г. популяция осетровых во всем Черном море практически потеряла промысловое значение. Итогом описанных событий стало заключение в 2000 г. между Россией и Украиной соглашения о запрете промыслового лова осетровых, которое в дальнейшем было продлено и действует в настоящее время. В 2009 г. все виды осетровых Черного моря были занесены в Красную книгу Украины. Многовековая история черноморского краснолова закончилась.

Есть ли повод для оптимизма?

Итогом выполненного историко-географического исследования стало заключение о том, что пессимистические выводы севавтопольских ученых — печальный факт. *Отечественное черноморское рыболовство в конце XX — начале XXI в. действительно пришло в депрессивное состояние.*

В результате воздействия на экосистему Черного моря комплекса природных и антропогенных факторов в территориальных водах СССР из почти 50 видов рыб, добывавшихся здесь в промышленных масштабах в начале XX в. [19, 20], к началу XXI в. осталось всего шесть, из которых три — массовые пелагические виды (шпрот, хамса и мелкая ставрида) и три — донные (мерланг, акула-катран и скаты). Эти шесть видов составляли основу промысла России после распада СССР, они же остаются приоритетными и сегодня [21]. Одним из самых



На приморском рыбном рынке. В начале XX в. прилавки вновь заполнились традиционными для 1950-х–1960-х годов видами кефали (вверху). Сегодня, как и много лет назад, здесь можно увидеть жирных луфариков и сладких окуней.

Фото автора



Новый объект промысла — рапана.

Фото автора

серьезных испытаний для экосистемы Черного моря стало вселение сюда в 1988–1989 гг. хищного гребневика мнемииопсиса (*Mnemiopsis leidyi*). Его развитие и распространение резко подорвало кормовую базу основных планктоноядных рыб. Хищник уничтожал и пищу рыб, и их личинки. В результате практически сошла на нет добыча хамсы. Из 13 лет присутствия гребневика три года отечественные рыбаки вообще не ловили хамсу, а в остальные годы добыча не превышала 15 тыс. т/год.

После распада СССР более 80% черноморской рыбохозяйственной инфраструктуры осталось на

Украине и в Грузии. Российский рыбохозяйственный комплекс был разрушен. Практически все оставшиеся на побережье морские рыбные порты и рыбоперерабатывающие предприятия перепрофилировались или обанкротились. В распоряжении рыбаков остались только два небольших порта — в районе Тамани и недалеко от Новороссийска. Сдача рыбы происходила в основном на арендованных причалах немногих портов. Число российских судов в Азово-Черноморском бассейне в 1994 г. уменьшилось по сравнению с 1985 г. в три раза. В 1998 г. в российской зоне Черного моря работало всего 31 рыбопромысловое судно [22]. Выросли затраты на топливно-энергетические ресурсы, сократились сроки промысловых работ в прибрежном лове, прекратилась практика экспедиционного лова в открытом море. Содержание судов стало убыточным, отсутствовали средства для обновления и модернизации флота.

В докризисный период (1975–1986) объем отечественного вылова рыбы в Черном море составлял 165–308 тыс. т., а в 1991–1995 гг. он снизился в 5–24 раза [18]. В 1998–2008 гг. объем добычи находился в пределах от 3.4 до 28.2 тыс. т. (табл.3). В 2009 г. было добыто всего 18.7 тыс. т рыбы.

Не менее печально обстояли рыбопромысловые дела и в водах других черноморских стран, к основным объектам промысла которых, кроме шести вышеперечисленных, сегодня относятся три вида кефалей, пелагические хищники луфарь

Таблица 3

Отечественная добыча водных биоресурсов в Черном море (т) [23]

Объект промысла	Годы										
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Шпрот	1242.3	4421.4	5568.4	11121.7	11217.8	20410.3	14323.7	13888.8	10616.2	6076.7	7814.1
Атерина	0.2	2.8	14.5	10.2	44.4	96.2	20.5	2.2	1.8	0.2	0
Ставрида	2.0	1.7	2.4	6.3	27.6	77.2	105.2	179.4	239.2	184.7	154.2
Хамса	1424.2	1424.5	2442.1	4231.6	8520.2	6834.3	6665	5256.3	3924.5	4427.8	8894.2
Пиленгас	398.6	30.6	63.5	118.4	170.4	246.5	277.7	46.7	66.7	84.7	46.9
Мерланг	118.5	180.4	335.8	545.9	655.5	93.0	54.9	78.2	60.5	97.3	96.5
Катран	22.2	41.6	21.7	51.5	32.0	48.0	48.1	19.0	23.9	32.6	58.5
Скат								16.7	17.0	11.8	10.6
Азово-черноморские кефали	0.1	35.3	21.3	3.4	8.0	64.5	90.2	55.3	96.0	34.5	34.1
Окунь	0.4	0.5	0.1	1.0	1.5	2.4	2.1	3.0	1.4	2.4	1.1
Сельдь	0.4	0	—	0	0.04	1.5	0.4	0.7	3.3	2.8	2.3
Барабуля	118.1	88.9	126.1	118.2	45.7	171.7	95.1	146.6	135.9	83.6	114.8
Камбала	10.0	—	3.6	12.0	28.6	11.2	1.7	13.2	10.5	6.8	4.7
Рапана	46.0	44.6	182.4	224.1	56.0	61.9	59.2	122.1	21.0	2.2	2.6
Ерш	0.1	1.2	1.2	1.7	3.3	5.2	3.7	1.4	1.9	1.8	0.9
Сарган	0.5	2.1	0.8	1.4	0.1	1.0	0.7	7.8	1.6	1.2	0
Карась	0	0	0.1	0	0.3	0.5	0.4	0.3	0	0.3	0
Смарида	0.6	0.5	0.5	0.6	1.0	3.3	3.5	3.6	3.9	0	2.1
Пелагида	0	0	—	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0.2
Бычок	2.0	1.3	10.6	17.5	37.0	26.6	—	0	0	0	0
Мидии	0	4.4	—	0	0	0.5	0	0	0	0	0
Креветка	0	0.1	1.1	0	0	0	0.4	0	0	0	0
Луфарь	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0.1	0
Итого	3386.2	6291.1	8796.3	16465.6	20861.4	28158.0	21752.8	19841.2	15225.3	11054.6	17254.0

Таблица 4

Суммарный вылов основных промысловых рыб в Черном море (т) [24]

Объект промысла	Годы										Среднее	%
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002		
Хамса	231731	299022	400894	280484	227135	204368	319712	280030	310275	358769	291242	78.4
Шпрот	14693	18339	21629	27991	27963	38117	39283	41727	62577	69903	36222	9.8
Мерланг	18636	15892	18143	20935	13263	12730	12974	15988	8787	8578	14593	3.9
Ставрида	4851	9046	10604	11463	8144	6604	5447	12465	9964	9147	8774	2.4
Барабуля	241	1309	1408	2326	1275	1582	1980	1057	1308	1814	1430	0.4
Кефали	4067	5118	7830	12934	8710	7887	9973	14260	6850	5841	8347	2.3
Камбала	1611	2144	2939	2048	1024	1588	1953	2789	2545	606	1925	0.5
Акула	1618	2637	1693	1946	1581	1477	1624	2596	890	281	1634	0.4
Скаты	659	715	214	306	122	182	256	988	528	268	424	0.1
Сарган	752	1255	499	256	322	286	339	161	492	317	468	0.1
Луфарь	11274	3348	3559	2217	1627	1660	1613	2958	7319	14091	4967	1.3
Прочие	1066	714	1729	1037	558	1397	677	6258	125	1730	1529	0.4
Всего	293192	359543	473174	365020	293731	279877	397855	382787	413555	471375	371554	100

Таблица 5

Среднегодовой вылов рыбы причерноморскими странами в 1993–2002 годах (т) [24]

Объект промысла	Страны					
	Турция	Украина	Россия	Грузия	Румыния	Болгария
Хамса	275104	9198	5010	1678	193	59
Шпрот	0	26444	3881	124	2240	3533
Мерланг	13875	23	220	95	375	3
Ставрида	8660	4	5	9	17	79
Барабуля	1293	18	100	12	3	6
Кефали	8033	14	10	6	1	22
Камбала	1795	56	10	4	5	55
Акула	1513	104	13	96	2	59
Скаты	375	29	21	0	0	0
Сарган	461	0	0.5	0	0.2	7
Луфарь	4945	0.2	0	0	3	19
Прочие	1400	24	14	4	31	33
Всего	317455	35914	9285	2028	2870	3875

и пелагида, а также донные камбала-калкан, барабуля и сарган. В сумме на долю этих объектов приходилось около 98% общего вылова рыбы в Черном море, составлявшего в период с 1996 по 2005 г. около 410 тыс. т/год [25]. При этом 78.4% суммарного улова всех черноморских стран составляла хамса, в меньших количествах ловили шпрота, мерланга, ставриду, кефалей и луфаря (табл.4). Доля остальных промысловых видов рыб не превышала 1% [24]. Больше всего рыбы в Черном море вылавливала Турция (85.5%), около 10% всех черноморских уловов доставалось Украине и только 2.5% добывала Россия (табл.5).



Сарган.

Но нет худа без добра! В результате резкого спада промышленного производства в конце прошлого века антропогенная нагрузка на природу Черного моря сократилась, а после вселения сюда гребневика бероз (*Beroe ovate*) — врага мнемипсиса — снизилось и негативное влияние последнего на морскую экосистему. Экологическая обстановка в прибрежной зоне Черного моря стала улучшаться, запасы многих видов рыб начали восстанавливаться [23]. Снижение пресса промысла также благоприятно отразилось на состоянии биоресурсного потенциала моря. В статистике российского черноморского рыболовства появились сведения о регулярных уловах саргана (до 7.5 т), барабули (до 147 т), ласкиря-ерша (до 5 т), смариды-окуня (до 3.9 т), сельди (до 3.3 т), кефалей-абориге-

нов (до 95 т). Случались уловы луфаря (до 100 кг в 2007 г.) и пелакиды (до 200 кг в 2004 и 2008 гг.).

Кроме того, в водах Черного моря стали добывать новые нерыбные объекты — рапану (до 122 т) и креветок (до 1.1 т). По прогнозам, их потенциальный вылов в ближайшие годы будет только расти [21].

Одесит Костя вновь, как в старые добрые времена, наполняет свои шаланды кефалью, а его земляки с нетерпением ждут возвращения в море их любимой скумбрии — качалки. Что-то она задерживается, в отличие от других традиционных в прошлом и теперь вновь появившихся объектов лова. Но в Одессе не зря стали советовать гостям: «Жора, жарь рибу!». А на вопрос «Где рыба?» отвечают: «Ты, Жора, жарь — *риба будет!*».

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-50-00095).

Литература / References

1. Берг Л.С. Массовое появление пелакиды у восточных берегов Черного моря. Ежегодник Зоологического музея Императорской академии наук. 1911; 4–9. [Berg L.S. Mass appearance of the pelamida at the eastern shores of the Black Sea. Yearbook of the Zoological Museum of the Imperial Academy of Sciences. 1911; 4–9. (In Russ.)]
2. Зуссер С.Г. Распределение и промысел пелакиды. Рыбное хозяйство. 1956; 12: 44–47. [Zusser S.G. Distribution and fishery of pelamida. Fisheries. 1956; 12: 44–47. (In Russ.)]
3. Любимова Т.Г. Закономерности распределения пелакиды в Черном море. Рыбное хозяйство. 1961; 8: 10–13. [Lyubimova T.G. Regularities of distribution of pelamida in the Black Sea. Fisheries. 1961; 8: 10–13. (In Russ.)]
4. Голенченко А.П. Распределение пелакиды в Черном море. Рыбное хозяйство. 1939; 2: 32–35. [Golenchenko A.P. Distribution of pelamida in the Black Sea. Fisheries. 1939; 2: 32–35. (In Russ.)]
5. Майорова А.А., Ткачева К.С. Крупная ставрида и пелакида в Черном море. Рыбное хозяйство. 1961; 8: 6–10. [Mayorova A.A., Tkacheva K.S. Large scad and pelamida in the Black Sea. Fisheries. 1961; 8: 6–10. (In Russ.)]
6. Ткачева К.С. Состояние запасов и перспективы промысла пелакиды. Рыбное хозяйство. 1958; 12: 10–13. [Tkacheva K.S. The state of the reserves and the prospects for the fishing of pelamida. Fisheries. 1958; 12: 10–13. (In Russ.)]
7. Ivanov L.S., Beverton R.J.H. The fisheries resources of the Mediterranean. Part 2. Black Sea. FAO Studies and Reviews. 1985; 60: 135.
8. Максимов Н.В. Морское рыболовство в Болгарии. Отчет по участию в зоологической экскурсии С.А.Зернова к берегам Болгарии и Румынии. Материалы к познанию русского рыболовства. СПб., 1914; 3(1): 1–80. [Maksimov N.V. Marine fishing in Bulgaria. Report on the participation in the zoological excursion of S.A.Zernov to the shores of Bulgaria and Romania. Materials for the knowledge of Russian fisheries. St. Petersburg, 1914; 3(1): 1–80. (In Russ.)]
9. Гудимович П.К. О развитии промысла ставриды в Черном море. Рыбное хозяйство. 1954; 1: 32–33. [Gudimovich P.K. On the development of the scad fishery in the Black Sea. Fisheries. 1954; 1: 32–33. (In Russ.)]
10. Тараненко Н.Ф. О возможности промыслового использования средиземноморской ставриды в Черном море. Рыбное хозяйство. 1954; 1: 42–44. [Taranenko N.F. On the possibility of commercial use of the Mediterranean scad in the Black Sea. Fisheries. 1954; 1: 42–44. (In Russ.)]
11. Шавердов Р.С. О крупной ставриде в Черном море. Рыбное хозяйство. 1961; 8: 14–19. [Shaverdov R.S. About a large scad in the Black Sea. Fisheries. 1961; 8: 14–19. (In Russ.)]
12. Алеев Ю.Г. О воспроизводстве южной популяции черноморской ставриды в северных районах Черного моря. Труды Севастопольской биологической станции. 1957; 12: 271–285. [Aleev Yu.G. On the reproduction of the southern population of the Black Sea scad in the northern regions of the Black Sea. Proceedings of the Sevastopol Biological Station. 1957; 12: 271–285. (In Russ.)]
13. Шавердовшвили Р.С. О факторах, предшествующих появлению «крупной» ставриды. Рыбное хозяйство. 1976; 2: 11–13. [Shaverdoshvili R.S. About the factors that preceded the emergence of the «big» scad. Fisheries. 1976; 2: 11–13. (In Russ.)]
14. Сыроватский И.Я. Промысел скумбрии в Черном море. Рыбное хозяйство. 1932; 11–12: 48–49. [Syrovatsky I.Ya. Mackerel fishery in the Black Sea. Fisheries. 1932; 11–12: 48–49. (In Russ.)]
15. Сыроватский И.Я. Черноморская скумбрия и пути развития ее промысла. Рыбное хозяйство. 1935; 10: 11–15. [Syrovatsky I.Ya. Black Sea mackerel and ways to develop its fishery. Fisheries. 1935; 10: 11–15. (In Russ.)]

16. Куманцов М.И. Возникновение и развитие рыболовства Северного Причерноморья. Часть 1 (от древности до начала XX века). М., 2011. [Kumantsov M.I. The emergence and development of fishing in the northern Black Sea region. Part 1 (from antiquity to the beginning of the twentieth century). Moscow, 2011. (In Russ.)]
17. Зернов С.А. К вопросу об изучении жизни Черного моря. Записки Императорской академии наук. 1913; 32(1). [Zernov S.A. On question of the study of life of the Black Sea. Zapiski Imperatorskoy akademii nauk. 1913; 32(1). (In Russ.)]
18. Зайдинер Ю.И., Попова Л.В. Уловы рыб и нерыбных объектов рыбохозяйственными организациями Азово-Черноморского бассейна (1990–1995 гг.). Статистический сборник. Ростов-на-Дону, 1997. [Zaydiner Yu.I., Popova L.V. Catches of fish and non-fish species by fishery organizations of the Azov-Black Sea basin (1990–1995). Statistical collection. Rostov-on-Don, 1997. (In Russ.)]
19. Александров А.И. Крымское рыболовство. Рыбное хозяйство. 1923; 2: 133–162. [Aleksandrov A.I. Crimean fishing. Fisheries. 1923; 2: 133–162. (In Russ.)]
20. Пузанов И.И. Материалы по промысловой ихтиологии Крыма. Рыбное хозяйство. Под ред. В.И.Мейснера. 2: 114–132. М., 1923. [Puzanov I.I. Materials on the field ichthyology of the Crimea. Fisheries. Ed. V.I.Meisner. 2: 114–132. Moscow, 1923. (In Russ.)]
21. Глубоковский М.К., Тарасюк С.Н., Зверькова Л.М. и др. Сырьевая база российского рыболовства в 2012 году (район российской юрисдикции). Справочно-аналитические материалы. М., 2012. [Glubokovsky M.K., Tarasyuk S.N., Zverkova L.M. et al. The raw material base of Russian fisheries in 2012 (area of Russian jurisdiction). Reference and analytical materials. Moscow, 2012. (In Russ.)]
22. Зайдинер Ю.И., Ландарь Е.А., Попова Л.В., Фильчагина И.Н. Рыбодобывающая подотрасль российского Азово-Черноморья в 90-х годах. Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Сборник научных трудов (1996–1997 гг.). Ростов-на-Дону, 1998; 412–420. [Zaydiner Yu.I., Landar E.A., Popova L.V., Filchagina I.N. The fish sub-sector of the Russian Azov-Black Sea region in the 90s. The main problems of fisheries and protection of waterbodies with fisheries in the Azov and Black sea basin: collected articles (1996–1997). Rostov-on-Don, 1998; 412–420. (In Russ.)]
23. Шляхов В.А., Гришин А.Н. Состояние планктонного сообщества и промысла пелагических рыб в Черном море после вселения гребневиков *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe ovata*. Рыбное хозяйство Украины. 2009; 5: 53–60. [Sblyakhov V.A., Grishin A.N. The state of the plankton community and the fishery of pelagic fishes in the Black Sea after the introduction of the ctenophores *Mnemiopsis leidyi* and *Beroe ovata*. Fisheries of Ukraine. 2009; 5: 53–60.]
24. Луц Г.И., Дахно В.Д., Надолинский В.П., Рогов С.Ф. Рыболовство в прибрежной зоне Черного моря. Рыбное хозяйство. 2005; 6: 54–56. [Lutz G.I., Dakhno V.D., Nadolinsky V.P., Rogov S.F. Fisheries in coastal waters of the Black Sea. Fisheries. 2005; 6: 54–56. (In Russ., Abstr. in Engl.)]
25. Sblyakhov V.A., Daskalov G.M. The State of marine living resources. State of the environment of the Black Sea (2001–2006/7). Istanbul, 2008.

The Black Sea: Ups-and-Downs in Domestic Fishery

D.Ya.Fashchuk^{1,2}

¹Institute of Geography, RAS (Moscow, Russia)

²Sibirskov Institute of Oceanology, RAS (Moscow, Russia)

The retrospective historical and geographical analysis of the Black Sea domestic fishery development has been made. The mechanisms, chronology, and causes of the changes (succession) of the top-priority objects of fishery in the second half of the 20th century for bonito, large scad, bluefish, chub mackerel, and some low-abundant but valuable by their tastiness fish species, including surmullet, mullets, and sturgeons have been established. The consequences of natural and anthropogenic changes, resulted in crisis of fishery industry in 1989–1991 and its transition to depressive state in the late 20th century have been assessed.

Keywords: the Black Sea, history of fishery, commercial fishery objects, the geography of fisheries.

Дома и улицы древнего Изборска

Н.В.Лопатин

Институт археологии РАН (Москва, Россия)

В результате археологических раскопок на Труворовом городище в Изборске полностью изучена территория древнерусского пограничного города. В статье представлены методы и результаты исторической реконструкции планировки и застройки города в первой половине XI в. В отличие от многих других русских городов, в культурном слое Изборска не сохранилась «органика» и от построек остались только фрагменты обугленных бревен и развалы печей. Тем не менее полная изученность этого памятника стала его преимуществом. На основе планов городских укреплений с въездными воротами и канавок от частоколов вдоль улиц удалось реконструировать систему кварталов города. Представить внешний вид жилых домов помогли аналогичные материалы лучшей сохранности, добытые археологами в других городах Руси.

Ключевые слова: Труворово городище, планировка, застройка, срубное жилище, печь-каменка, деревянная мостовая, частокол.

Исследования Труворова городища, где в древности располагался летописный город Изборск (в 30 км к западу от Пскова), в 1971–1992 гг. проводились экспедицией Института археологии АН СССР под руководством В.В.Седова. В результате этих работ почти полностью раскопана территория древнего города, изучены его укрепления, получена значительная коллекция находок, хранящаяся ныне в Музее-заповеднике «Изборск». В предыдущей статье речь шла об остатках и возможностях реконструкции оборонительных сооружений памятника [1]. Остановимся теперь на материалах, характеризующих застройку и планировку города.

К несчастью для археологов, в культурном слое такого интересного города, как Изборск, не сохранились остатки деревянных построек. А ведь именно они определяли внешний облик древнерусских городов. Эта неудача объясняется расположением памятника — на высоком мысу, сложенном трещиноватыми известняками, т.е. породой, хорошо пропускающей воду. В результате остатки материальной культуры древних изборжан оказались в условиях, идеальных для гниения «органики». Высохший и спрессованный культурный слой Изборска на Труворовом городище, отложившийся с VIII по XIII в., имеет толщину около 1.5 м. Для сравнения: средневековые культурные слои русских городов (Новгорода, Пскова, Москвы и многих других), подстилаемые водоупорными мате-



Николай Владимирович Лопатин, кандидат исторических наук, заведующий информационно-издательской группой Института археологии РАН. Область научных интересов — раннеславянская и древнерусская археология, изучение археологической керамики.
e-mail: n.lopatin@gmail.com.

риковыми породами (глинами), достигают многометровой мощности и прекрасно сохраняют нижние части всех деревянных построек.

Мало того, относительно хорошо сохранились в Изборске лишь наслоения второй половины XII в. — XIII в., которые составляли больше половины отложений вышеперечисленных долгих столетий и соответствуют предельному оживлению городской жизни в тревожные времена противостояния Новгорода и Пскова с западными соседями. Более ранние горизонты сильно испорчены и местами полностью уничтожены в процессе градостроительной деятельности.

Некоторые периоды истории города вообще слабо представлены археологическими остатками, что свидетельствует о незначительной интенсивности городской жизни. Вряд ли следует вести речь о полном запустении города в то или иное время, но очевидно, что были довольно длительные промежутки между обострениями пограничной напряженности, когда большинство населения покидало тесную территорию внутри городских стен и расселялось по неукрепленным поса-



Развал печи-каменки (слева) и открытый очаг. Раскопки 1977 г. [3, с.131, 136].

дам и близлежащим деревьям, удобным для ведения хозяйства.

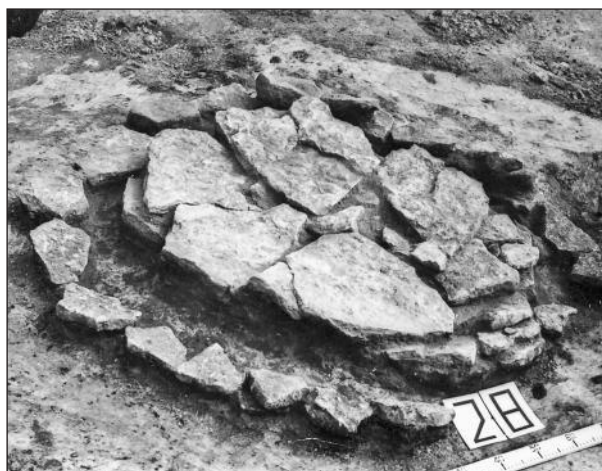
Таким образом, динамика развития Изборска сильно зависела от политического климата в регионе. Если в раннее, «протогородское», время (VIII—X вв.) Изборск был значительным центром собственной округи, то позднее стал играть роль пограничной крепости Новгородской и Псковской земель, важность которой возрастала в периоды военных конфликтов и уменьшалась в мирное время.

Обратимся к материалам раскопок, характеризующим жилую застройку города. Они содержатся в обобщающей монографии автора раскопок [2], а также в полевых отчетах, хранящихся в архиве нашего института [3]. В условиях отсутствия органических остатков первым источником по этой теме становятся развалы отопительных устройств — печей и очагов, сооружавшихся из камней (гранитных валунов) и глины. Основным типом печи была каменка, но варианты ее многообразны. Применение глины как связующего материала было необязательным: многие печи сложены из камней «насухо». Встречаются и глинобитные печи. В тех случаях, когда сохранилось основание печи, видно, что она была прямоугольной или овальной формы размерами около 1,5×1,5 м. Опечек (фундамент печи) часто сооружался с применением известняковых плит — наиболее доступного местного материала. Всего в разных горизонтах за 12 сезонов раскопок площадки городища обнаружены остатки 534 печей, в том числе сохранивших форму и размеры опечка — 138. Большинство их спрессовано в невысокие скопления или развалы толщиной менее 20 см.

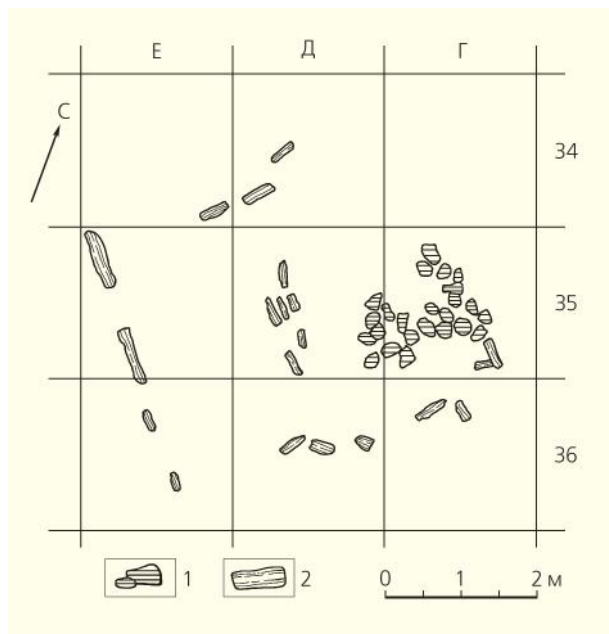
Открытые очаги овальной формы, которые ограничены по краю поставленными на ребро плитами, довольно редки и относятся к нижним слоям поселения. Их обнаружено всего 25, за исключением сомнительных случаев.

Вторая категория материалов, относящихся к нашей теме, — остатки стен и полов построек, погибших в пожарах, в виде обугленной древесины. Как правило, это фрагменты отдельных бревен,

лишь изредка они составляют углы или более крупные детали нижних венцов срубов домов. Наиболее часто на месте сгоревшего жилища оставался лишь небольшой слой угля, выровненный при подготовке площадки для нового строительства. За все годы раскопок было раскрыто несколько десятков объектов, по которым можно судить о размещении



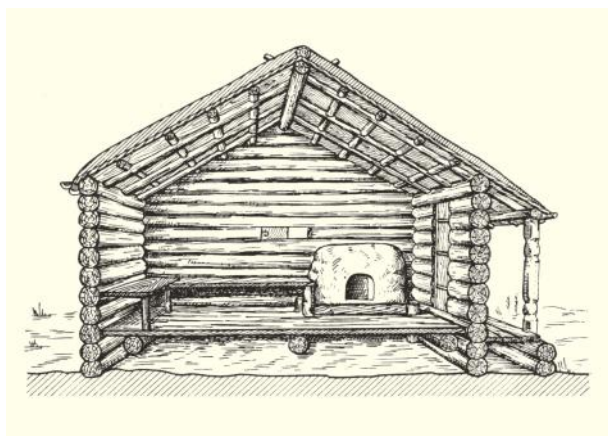
Остатки глинобитной печи в разрезе (вверху) и ее расширенное плитняковое основание. Раскопки 1981 г. [2, с.65, 136].



Остатки жилого дома с печью-каменкой. Условные обозначения: 1 — обожженные валуны; 2 — обугленное дерево. Раскопки 1976 г. [2, с.122].

печи внутри постройки и об ориентировке стен на площадке поселения либо измерить длину хотя бы одной стены (реже — двух).

Немногочисленные данные позволяют, тем не менее, сделать следующий вывод: основным типом построек на Триворовом городище был небольшой наземный срубный дом близких к квадрату пропорций, размерами от 12 до 16 м² (редко больше), с печью в углу [2, с.70]. Такие жилища относят к северо-восточнославянскому типу — в противоположность полуземлянкам, преобладавшим в землях Южной Руси вплоть до XII в. [4, с.122, 126]. Полученный вывод о самых общих признаках изборских домов позволяет привлечь для их реконструкции материалы археологических исследований



Реконструкция наземного срубного жилища X—XI вв. [4, с.160].

в городах Северной Руси, где дерево сохранилось не в пример лучше, — в Новгороде, Ладоге, Пскове и др. На основе материалов раскопок этих городов специалистами сделаны реконструкции внешнего облика и интерьера стандартного древнерусского северного дома [4, с.160; 5]. Новгородские материалы [6] дают заметное разнообразие домостроительных традиций в приемах сооружения срубов и в их размерах (что связывают с социальной дифференциацией обитателей), в конструкциях и расположении печей в интерьере. Выявлены свидетельства двухэтажности некоторых домов. Многочисленны наблюдения о планировочной структуре усадеб, делившихся на жилую и хозяйственную зоны. Все это многообразие для реконструкции застройки Изборска малоактуально: слишком тесно расположены здесь остатки печей, практически нет следов крупных построек, а отдельным усадьбам просто и поместиться негде.

Поиски аналогий домостроительной и планировочной традиций Изборска привели нас к нескольким хорошо изученным древнерусским памятникам, из которых наиболее интересен город, исследованный белорусским археологом П.Ф.Лысенко, — древнее Берестье [7]. Его остатки сохранились в виде великолепного археологического музея на территории Брестской крепости. Этот город во многом сходен с Изборском: он также был не столичным, но порубежным — на западной границе Киевской Руси с Польским королевством. В то же время он знаменит в археологии уникальной сохранностью остатков жилищ, превосходящей новгородскую. В конце XII в. — XIII в. в Берестье сложились условия, при которых культурный слой накапливался исключительно быстро и постройки буквально «уходили в землю». В результате многие из них сохранились на значительную высоту, а в нескольких случаях — до 12–13 венцов. Обнаружены полные дверные проемы и полотна высотой в среднем около 1 м. Вычислена приблизительная высота стен домов — 180–210 см. Наиболее существенно для нас, что сопоставимые с остатками изборских домов признаки имеют близкие значения: квадратные наземные срубы размерами 12–16 м², редко до 20 м², с печью в углу (правда, почти все печи глинобитные) [7, с.178, 189]. Большинство домов имело дощатые полы, что фрагментарно зафиксировано и в Изборске. В Берестье целыми сериями представлены также детали двускатных крыш — самцы (бревна из фронтона со скосами) и курицы (крюки, поддерживавшие опору нижнего края дощатой кровли) [7, с.191]. Все эти детали необходимы для реконструкции подобных домов Изборска.

Наконец, третья категория материалов для реконструкции застройки Изборска — это признаки его планировки — канавки от частоколов, окружавших центральную часть города (детинец) и проходивших вдоль улиц, и остатки трех основных ворот. Западные и восточные ворота были

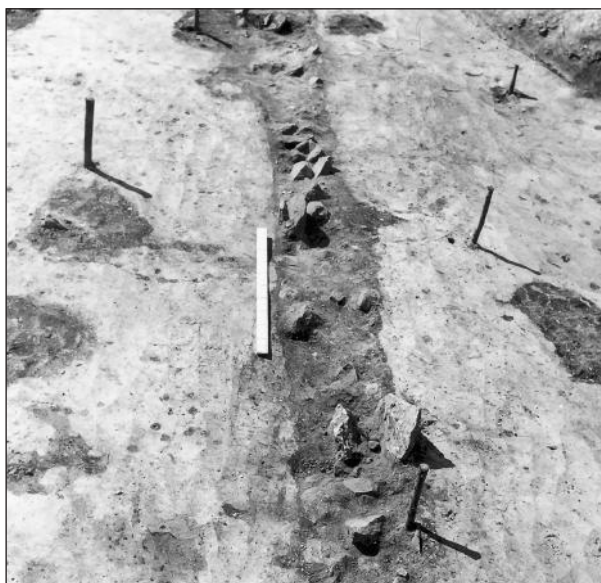
въездными в город (на территорию окольного города), а через внутренние ворота окольный город соединялся с детинцем. Почти полностью сохранился замкнутый контур ограда детинца, занимавшего примерно одну треть всей площади города в его мысовой части. В средней части фронтальной стены частокола детинца располагалась квадратная проездная башня, следами которой являются четыре ямы от мощных столбов. Канавки от частоколов вдоль улиц окольного города сохранились на отдельных участках.

И вновь характерный сравнительный материал предоставляет Берестье, где раскопками зафиксирована рядная (возможно, всерная) планировка: параллельные улицы пересекали город, расходясь от точки предполагаемого въезда [7, с.173–175]. В Изборске общая картина более определена, поскольку территория города раскопана широкой площадью и трассы улиц сочетаются с вышеуказанными воротами. Параллельные улицы, проходящие по территории окольного города в широтном направлении (главная из них проходила от западных до восточных ворот), пересекаются одной поперечной улицей, направление которой угадывается на основе двух ориентиров: это проездная башня детинца в центре площадки и участок частокольной канавки на юге, образующий прямой угол с частоколом главной улицы. В результате получается система из нескольких вытянутых кварталов.

В Берестье установлено, что кварталные частоколы не были сплошными, а сооружались в промежутках между домами, которые тыльной глухой стеной также выходили непосредственно на линию улицы. Кроме того, там были изучены и заборы другого облика — из горизонтальных жердей, а также в виде плетня. Разнообразие возможных конструкций уличных заборов объясняет фрагментарную сохранность частокольных канавок в Изборске.

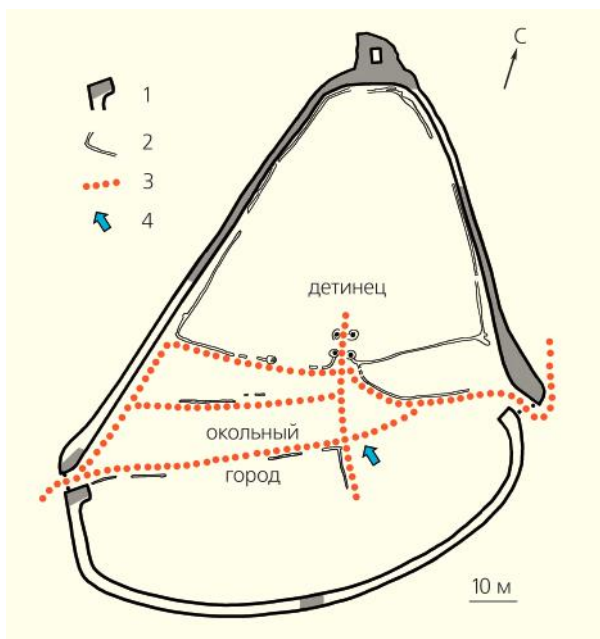
Исследователь Берестья пришел к выводу, что этот город по причине ограниченности небольшой площади естественными рубежами (руслами рек) был застроен крайне тесными рядами жилищ, зачастую стоявших вплотную друг к другу, по 2–4 параллельных ряда между улицами [7, с.198]. Естественная ограниченность площадки крутыми склонами мыса характерна и для Изборского городища.

Последний вопрос, требующий обсуждения: имелись ли на улицах Изборска деревянные настилы мостовых, подобные открытым в Новгороде и других средневековых городах Руси, в том числе и в Берестье? С одной стороны, отмеченные выше почвенные условия городищенского мыса Изборска как будто позволяли горожанам обойтись без особенных забот об устройстве мостовых. Это хорошо видно в Изборске и в наши дни, поскольку известняковая материковая плита, находящаяся здесь повсюду под ногами, обеспечивает хорошее состояние всех дорог, в том числе и не имеющих специального покрытия, в любую погоду. И всё же

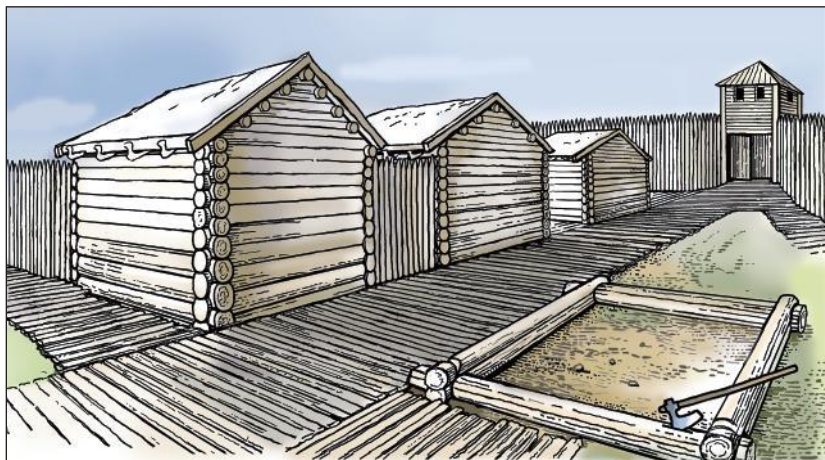


Темный культурный слой в заполнении канавки частокола детинца при зачистке глинистого материка в раскопе 1979 г. [2, с.141].

значительный фрагмент (протяженностью более 4 м) деревянного настила мостовой в обугленном состоянии был исследован на Изборском городище во время раскопок 1988 г. на участке западного въезда в город. План остатков этого настила уже публиковался в журнале [1, с.57]. Таким образом,



Планировка Изборска первой половины XI в.: 1 — внешние крепостные стены (заливкой выделены участки, документированные раскопками); 2 — частокольные канавки; 3 — улицы; 4 — направление вида на застройку города (см. рис. на следующей странице). Реконструкция автора.



Вид на застройку окольного города и въезд в детинец Изборска. Первая половина XI в. Реконструкция автора. Консультант Вл.В.Седов. Художник Н.С.Сафронова.

следует предполагать, что в условиях высокой плотности застройки города, связанной с большим объемом бытовых и строительных отходов,

слой предоставляет слишком мало данных для ее реконструкции. Известно лишь, что обособленного детинца внутри города в это время уже не было. ■

сооружение деревянных мостовых было необходимо средневековым изборянам ради поддержания улиц в порядке.

Вооружившись набором перечисленных данных, можно вообразить, как выглядел город изнутри, увидеть его глазами человека, идущего по одной из улиц.

По сравнению с Берестьем описанная система планировки фиксируется в Изборске для более раннего времени — первой половины XI в. Остатки более поздних печей XII—XIII вв. сплошь и рядом перекрывают на плане трассы прежних улиц. Планировка города в этот период существенно изменилась, но однородный и высушенный культурный

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-01-00265-ОГН).

Литература / References

1. Лопатин Н.В. Стены и башни древнего Изборска. Природа. 2017; 1: 55–59. [Lopatin N.V. Walls and towers of ancient Izborsk. Priroda. 2017; 1: 55–59. (In Russ.)]
2. Седов В.В. Изборск в раннем Средневековье. М., 2007. [Sedov V.V. Izborsk in the early middle ages. Moscow, 2007. (In Russ.)]
3. Седов В.В. Отчет об археологических работах Изборской экспедиции Института археологии АН СССР в 1977 г. Архив ИА РАН. Ф-1. Р-1: 6762. [Sedov V.V. Report on the archaeological work of the Izborsk expedition of the Institute of archeology of Academy of Sciences, USSR in 1977. Archive of IA RAS. F-1. R-1: 6762 (unpublished)]
4. Раппопорт П.А. Древнерусское жилище (Археология СССР. Свод археологических источников. Е1–32). Л., 1975. [Rappoport P.A. Old Russian dwelling (Archaeology of the USSR. Corpus of archaeological sources: E1–32). Leningrad, 1975. (In Russ.)]
5. Спегальский Ю.П. Жилище Северо-Западной Руси IX—XIII вв. Л., 1972. [Spegalsky Yu.P. Dwelling of North-Western Russia in IX—XIII centuries. Leningrad, 1972. (In Russ.)]
6. Фараджева Н.Н. Срубные постройки древнего Новгорода (вопросы сложения и эволюции). Российская археология. 2007; 1: 115–125. [Faradjeva N.N. Log buildings of ancient Novgorod (appearance and development). Russian archaeology. 2007; 1: 115–125. (In Russ.)]
7. Лысенко П.Ф. Берестье. Минск, 1985. [Lysenko P.F. Berestyie. Minsk, 1985. (In Russ.)]

Houses and Streets of Ancient Izborsk

N.V.Lopatin

Institute of Archaeology, RAS (Moscow, Russia)

Archaeological excavations of the Truvor hillfort in Izborsk studied the entire territory of an old Russian border town. The article presents the methods and results of the historical reconstruction of the town planning grid and buildings in the first half of the XIth century. Unlike many other Russian towns, the cultural layer of Izborsk has not preserved organic remains, so only fragments of carbonized logs and collapses of stoves have survived from the log houses. At the same time, the advantage of this site is a full study of the territory. Based on the plans of the town fortifications with gates and palisade trenches along the streets the system of town quarters has been outlined. Similar materials of better preservation obtained by archaeologists in other towns of Russia help to present the appearance of dwellings.

Keywords: Truvor hillfort, planning grid, town buildings, log house, stone stove, wooden pavement, palisade.

Почетный член академии герцог Максимилиан Лейхтенбергский

Времена и люди

кандидат исторических наук Е.Н.Груздева

Санкт-Петербургский филиал Архива РАН (Санкт-Петербург, Россия)

e-mail: elgru@rambler.ru

В Императорской Санкт-Петербургской академии наук в первой половине XIX в. стало привычным избирать в почетные члены далеких от науки людей: государственных и военных деятелей, представителей знати и высших чиновников, членов императорской фамилии. Высокое звание, которое предполагало наличие научных заслуг и должно было служить знаком признания их академией, стало разменной монетой в политике империи. Его получили прусские короли Фридрих Вильгельм III и IV, король Дании Кристиан VIII, король Швеции и Норвегии Оскар I, российский император Николай I, его брат и сыновья, причем великий князь Александр Николаевич стал почетным академиком в восьмилетнем возрасте. Большинство из них не оставили даже слабого следа в науке. Одним из исключений стало избрание в почетные члены Академии наук баварского герцога Максимилиана Лейхтенбергского. Его интерес к научным экспериментам, пылкость и настойчивость исследователя, талант организатора способствовали достижению значительных результатов в изучении электрохимии и практическом применении гальванических технологий.

Ключевые слова: герцог Максимилиан Лейхтенбергский, Императорская Санкт-Петербургская академия наук, почетный член академии, электрохимия, гальванопластика, гальванография.

В Санкт-Петербурге 14 июля 1839 г. состоялось бракосочетание дочери российского императора великой княжны Марии Николаевны и Максимилиана Богарне*, герцога Лейхтенбергского. Отношение к этому браку было неоднозначным как в России, так и в Европе. Многие считали его мезальянсом, унижающим российский императорский дом. Возможно, для того чтобы сгладить подобные шероховатости, Николай I осыпал Максимилиана милостями: даровал ему титул Императорского Высочества, дал чин генерал-майора и сделал его шефом гусарского полка. Еще до свадьбы герцог получил ордена Российской империи — орден Святого Александра Невского (30 августа 1837) и орден Святого Андрея Первозванного** (23 октября 1838).

Оставшись в России и неся службу в русской армии, Максимилиан Лейхтенбергский одновременно проявил себя на общественном и научном поприщах. В 1839 г. он был избран почетным членом Императорской академии наук; в 1842 г. — почетным членом Академии художеств (в 1843 г. он стал ее президентом); в том же 1842 г. назначен членом Особого комитета и Строительной комиссии для устройства железной дороги Москва—Санкт-Петербург; в 1844 г. возглавил институт Корпуса горных инженеров.

Все назначения герцога Лейхтенбергского на должности не были случайными. Адмирал Ф.П.Литке, близко знакомый с императорской семьей как воспитатель одного из сыновей Николая I, считал: *Если царь русский назначает своих братьев и детей начальниками разных важных частей управления, то совсем не для того, чтобы они были прапорщиками или даже генералами — такие всегда*

© Груздева Е.Н., 2018

* Максимилиан Иосиф Евгений Август Наполеон де Богарне (1817–1852) — баварский герцог Лейхтенбергский (III-й), сын пасынка Наполеона I Эжена (в русской историографии его часто именовали «Евгением») де Богарне и баварской принцессы из рода Виттельсбахов.

** Согласно статуту, жалующий орденом Святого Апостола Андрея Первозванного, «хотя бы прежде не имел других Российских орденов», этим единым пожалованием становился сразу кавалером младших российских орденов: Святого Александра Невского и Святой Анны первой степени, а также бывших польских орденов: Белого Орла и Святого Станислава первой степени [1, 2]. Этот орден был династическим отличием Российской империи: каждый родившийся в императорской семье мальчик становился кавалером ордена при крещении. Представителям иностранных правящих династий российские ордена вручались во время создания политических и династических союзов или же для их подкрепления. Жалование орденов Максимилиану Лейхтенбергскому имело, прежде всего, дипломатическое значение.



Герцог Максимилиан Лейхтенбергский и великая княгиня Мария Николаевна. 1839 — начало 1840-х годов. Российская национальная библиотека, Санкт-Петербург.



Герб Эжена де Богарне, который (с изменениями) впоследствии унаследовали герцоги Лейхтенбергские и их российские потомки.

найдутся и лучшие их, — но чтобы иметь помощников по сердцу, которые не только не имели бы, но и не могли бы иметь ни малейшего повода искать чего-нибудь иного, не могли бы иметь иной цели, кроме пользы государственной и славы государя. Но быть таким помощником, в самом деле, можно не иначе как узнав поручаемую часть основательно [3, ф.34, оп.1, д.1, л.35об.]. Административная деятельность зятя императора — яркий пример успешного осуществления этой политики. Залогом успеха были разносторонние интересы герцога.

Молодой баварец получил хорошее образование, которым руководили его мать* и граф Межан**. Он увлекался искусством, сам неплохо ри-

* Августа Амалия Людовика (1788–1851) — дочь баварского короля Максимилиана I, жена Эжена де Богарне, герцогиня Лейхтенбергская.

** Этьен Пьер Межан (1766–1846) — французский адвокат, публицист. В годы Великой Французской революции сотрудник О.Г.Р.Мирабо; впоследствии ближайший помощник Эжена де Богарне, в бытность последнего вице-королем Италии — государственный советник Итальянского королевства, секретарь штаба вице-короля; вместе с Богарне переехал в Баварию, выполнял при нем обязанности адъютанта и секретаря, позже стал гувернером его детей, а затем камергером короля Баварии.

совал, унаследовал от отца не только богатую коллекцию живописи и скульптуры (часть которой перевез в Петербург), но также серьезные знания в этой области и художественный вкус, был не чужд меценатства. Его Высочество занимали естественные науки и особенно минералогия и палеонтология, он даже опубликовал статью об ископаемых окаменелостях из окрестностей Царского Села [4]. Живя в России, герцог пополнял минералогическую коллекцию в Айхштете, основанную еще его отцом, для которой собирал образцы русских минералов*. Осенью 1845 г. император направил зятя с инспекцией на Урал, где за два месяца Максимилиан Лейхтенбергский посетил многие предприятия и рудники — Ижорские, Воткинские, Златоустовские — и в отчете представил Николаю I подробное описание и свою оценку состояния дел на уральских заводах.

Максимилиан Лейхтенбергский еще юношей в Баварии был хорошо знаком с современными научными открытиями и техническими новинками. Когда осенью 1838 г. российский наследник цесаревич Александр проездом посетил Мюнхен, он сообщил в Петербург свои впечатления: *Сегодня поутру я осматривал любопытный маленький артиллерийский музей генерала Цоллера.* <...> *Мы еще осматривали дворец [герцогини. — Е.Г.] Лейхтенбергской с прекрасной картинной галереей, Gliptothèque** и непонятный гальванический телеграф, оно точно похоже на дьявольщину*** [8].* В Петербурге же герцог стал не только наблюдателем, но и непосредственным участником исследований и автором открытий.

В конце 1830-х годов гальванизм и электрическая химия были модными и популярными научными направлениями и в Европе, и в России. В лабораториях ставились многочисленные эксперименты. В октябре 1838 г. работавший при Санкт-Петербургской академии наук физик Б.С.Якоби**** объявил об изобретении способа получения металлических копий с объемных изображений гальваническим путем. В декабре сообщение об этом открытии появилось в «Санкт-Петербургских ведомостях»***** и в ближайшие месяцы обошло едва ли не все европейские газеты. Изобретение Якоби, названное гальванопластикой, привлекло внимание и ученых, и любителей: все желающие могли провести несложный эксперимент,



Б.С.Якоби, профессор Дерптского университета. Гравюра Э.Гау. 1837 г. Библиотека Тартусского университета.

освоить и развить технологию, найти способы ее практического применения. Самым очевидным было создание копий художественных произведений, тем более что первые опытные образцы гальванопластических изделий были копиями гравюр, барельефов и медалей.

Новый метод сразу начали осваивать полиграфисты. Первое промышленное применение электрохимической технологии получила в Экспедиции заготовления государственных бумаг, где в 1839 г. была создана гальванопластическая мастерская для изготовления медных стереотипов — клише для печати новых денежных знаков. Проводимая в России министром финансов Е.Ф.Канкри-

* Минералогическую коллекцию для герцога подбирали по приказу императора, что позволило Его Высочеству получать редкие образцы из собрания музея Горного института (например, по просьбе герцога для него был отделен небольшой кусок от образца самородного метеоритного железа, найденного на Алтае [5, ф.963, оп.1, д.4762, л.1–2об.]) и обеспечило помощь министра внутренних дел Л.А.Перовского [6, ф.1021, оп.1, д.82]. Российские штудфы герцог высылал в Баварию, где они и поныне хранятся в Мюнхенском государственном минералогическом собрании [7].

** Глиптотека — музей в Мюнхене, основу которого составили скульптурные памятники, преимущественно античные, собранные в 1805–1816 гг. баварским кронпринцем, будущим королем Людвигом I.

*** Судя по реакции российского цесаревича, электромагнитный телеграф профессора Мюнхенского университета К.Штейнгеля поразил его воображение, хотя в России уже был известен и использовался телеграф оптический.

**** Немец Мориц Герман фон Якоби (1801–1874) в России стал именоваться Борисом Семеновичем.

***** О новом открытии, сделанном профессором Якоби // Санкт-Петербургские ведомости. 24 декабря 1838. №291. С.1319.

ным денежная реформа нуждалась в создании депозитных билетов, которые было бы невозможно подделать, и новые технологии открывали в этом направлении широкие перспективы.

Другой опыт применения гальванопластики был поставлен в Военно-топографическом депо Главного штаба, где печатались карты. Якоби имел привычку делать краткие дневниковые записи, которые позволяют дополнить известные факты некоторыми деталями. Так, 29 октября 1839 г. ученый записал о своем визите к начальнику депо Ф.Ф.Шуберту: *Император приказал ему через графа Чернышева испытать применение гальванопластики к получению отпечатков на меди на картах и для этого связаться со мной. Я обратил его внимание на то, что можно было бы легко изготавлять рельефные планы крепостей. Он хотел на следующий день прийти ко мне. Запись следующего дня: Генерал Шуберт пробыл у меня почти 2 часа, точно объяснил и показал ему все, касающееся гальванопластики. Я должен заказать для него аппарат, а он официально даст мне это поручение из канцелярии Генерального штаба* [3, ф.187, оп.1, д.338, л.3]. Дальнейшие страницы дневника содержат упоминания о частых встречах с Шубертом, о демонстрации ему метода гальванопластики, о поездках Якоби в Генеральный штаб для наладки приобретенного аппарата и консультаций. Однако электрохимические эксперименты в картографии, по-видимому, вызвали разочарование. Из отзыва Шуберта от 4 апреля 1844 г. следовало, что опыты *производились весьма удачно, но не давали результатов, которые можно было бы применить к делу, аппараты пришли в негодность, и все купленные материалы были израсходованы* [9, с.452]*.

Первое знакомство герцога Лейхтенбергского с изобретением Якоби, возможно, состоялось 26 сентября 1838 г. в Пулковско во время посещения императором и его молодым зятем новой академической обсерватории. Для Николая I, пожелавшего, чтобы ему показали способ создания «изображений на медных досках посредством гальванизма», в библиотеке обсерватории организовали демонстрацию гальванопластического аппарата, пояснения к которому давал сам автор**.

По-видимому, демонстрация заинтересовала герцога, вызвала желание ближе познакомиться с эффективным процессом. Вскоре, 13 декабря 1839 г., на заседании Конференции Академии наук ее президент внес предложение об избрании гер-

цога Лейхтенбергского почетным членом Императорской академии наук. Можно только предполагать, что послужило тому причиной: интерес молодого баварца к наукам или его принадлежность к императорской фамилии? Как бы то ни было, академики единодушно поддержали предложенную кандидатуру [3, ф.1, оп.1, д.90, л.217]. А в начале 1840 г. герцог лично посетил профессора Якоби для знакомства с его изобретением.

Визит состоялся 8 января 1840 г., и Якоби записал в дневнике: *Герцог приехал в 7 часов в отвратительную погоду с доктором Магиром*** и пробыл около 1.5 часов. Я сделал в его присутствии медаль* [3, ф.187, оп.1, д.338, л.13об.]. По-видимому, августейший гость пожелал приобрести подобный гальванопластический аппарат для самостоятельных занятий, ибо уже через месяц Якоби отметил: *Утром был д-р Магир, и я дал ему прибор, состоящий из четырехугольного свинцового сосуда, цинковых цилиндров, проволоки, платиновой пробной проволоки и буссоли, все для герцога Лейхтенбергского, кроме того, позолоченной и посеребренной бумаги, чтобы делать с ними опыты* [3, ф.187, оп.1, д.338, л.17]. Первое время, пока герцог осваивал технику работ, ученый его консультировал и оказывал помощь. Когда вышла из типографии книга «Гальванопластика» с подробным описанием изобретенного способа копирования, автор послал в подарок Его Высочеству один экземпляр на немецком языке****.

Между Якоби и герцогом Лейхтенбергским завязалась переписка [3, ф.187, оп.1, д.338, л.35–35об.]: неофит пользовался консультациями ученого, присылал ему опытные образцы — продукты своих гальванопластических экспериментов, делился наблюдениями, они обменивались мнениями о достигнутых результатах. Якоби согласился представить «остроумные приложения гальванопластики» Академии наук. Поскольку в собраниях академии могли принимать участие только ее действительные члены (Его Высочество был почетным членом), Якоби на заседании 7 августа 1840 г. зачитал от имени герцога Лейхтенбергского доклад «Несколько новых опытов по гальванопластике» [3, ф.1, оп.1а, д.62, л.77об., 78].

Августейший исследователь сообщал, что за последние месяцы им были поставлены серии опытов, рассматривающих разные способы применения техники гальванопластики. Особое внимание он уделил гальванографии. Герцог заинтересовался способом изготовления клише для пе-

* Первый неудачный опыт не помешал картографам наблюдать за развитием гальванографии и гальванотипии, а впоследствии успешно использовать новейшие технологии в военной топографии.

** О посещении императором и герцогом Лейхтенбергским Пулковской обсерватории писали столичные газеты: «Санкт-Петербургские ведомости» (8 октября 1839. №230. С.1037) и «Северная пчела» (10 октября 1839. №228. С.909).

*** Густав Адольф [Фердинандович] Магир (1807–1842) — баварский врач, хирург. Был придворным врачом герцога Лейхтенбергского и его супруги.

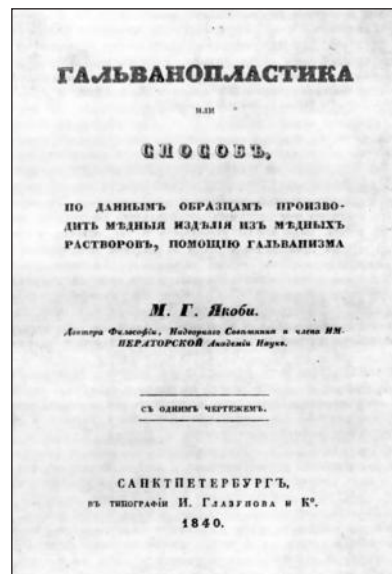
**** Книга издавалась на двух языках, сначала вышел тираж на русском, и Якоби преподнес роскошные экземпляры императору и президенту Академии наук графу С.С.Уварову.

чатных изображений, который на основе открытия Якоби разработывал мюнхенский профессор Ф.Кобелл*. Герцог Лейхтенбергский стал пионером этого направления в России и смог развить и усовершенствовать идею Кобелла. В докладе Академии наук было рассказано не только о достигнутых результатах при гравировке на меди или серебре, но затронуты и другие вопросы. В частности, был предложен оригинальный способ получения оттиска гравированной пластины на чрезвычайно тонкой бумаге, при котором использовалась не обычная черная краска для калкографии, а смоляная (состоящая из даммаровой смолы, красной охры и терпентинного масла). Герцог нашел и простой способ, как *снять матрицу оригинала и копию матрицы, не смазав при этом оттиска и не нарушив целостности пластин*: сначала распустить на гравированной пластине стеарин и потом поднять пластину с помощью нити [3, ф.187, оп.1, д.12, л.1–4об.].

Комиссия в лице академиков Е.И.Паррота, А.Я.Купфера и Э.Х.Ленца дала благоприятный отзыв о заслушанном сообщении, предложила его опубликовать и пожелала исследователю продолжить свои замечательные труды на пользу искусства и науки.

Признавая интерес и важность экспериментов герцога Лейхтенбергского, Якоби в своем отзыве подчеркнул расширение технических возможностей, которое дает гальванопластика: представленные герцогом образцы оттисков он демонстрировал многим любителям искусств, и все соглашались с тем, что этот метод допускает высокую степень усовершенствования и может быть расширен... что результаты, полученные уже сейчас, бесконечно превосходят те, которые относятся к началу искусства литографии, — искусства, соперничающего на наших глазах с гравюрой и штрихом. Более того, Якоби показал некоторые факсимиле герцога медальеру Я.Я.Рейхелю, руководившему работами в Экспедиции заготовления государственных бумаг, и тот решил выполнить сам или дать выполнить под своим руководством искусному рисовальщику какой-либо рисунок посредством этих способов и выяснить... какой из них лучше подходит для рисунков такого рода [3, ф.956, оп.1, д.84, л.148]. Можно предполагать, что усовершенствования, внесенные герцо-

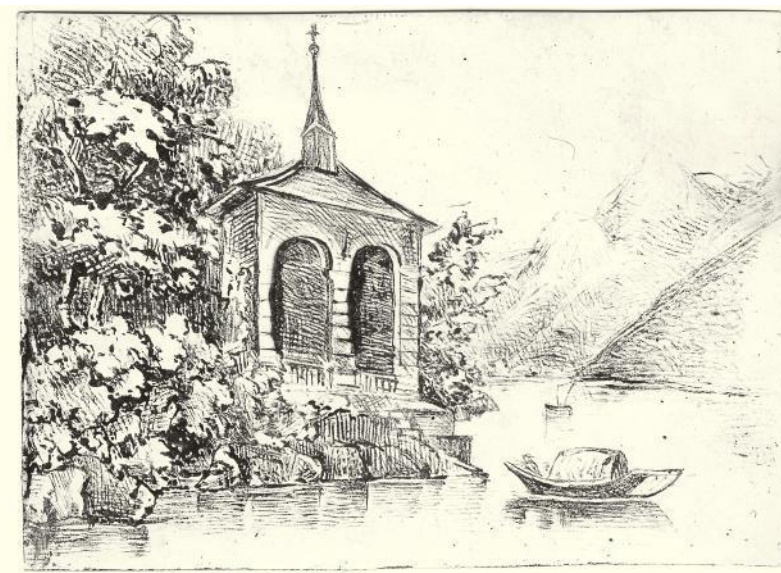
* Франц фон Кобелл (1803–1882) — немецкий ученый-минералог, фотограф. Подробнее о методе Кобелла см. [10].



Титульные листы первых изданий книги Б.С.Якоби «Гальванопластика» (СПб., 1840) на русском [3, ф.187, оп.1, д.4, л.2] и немецком языках [3, ф.187, оп.1, д.5, л.2].



Сцена в гальванопластической мастерской: извлечение клише из ванны. Иллюстрация из книги: Werner F. Ritter der St. Stanislaus Ordens. Die Galvanoplastik in ihrer technischen Anwendung. Mit 12 Kupfertafeln (St.-Petersburg, 1844) [3, ф.187, оп.1, д.11, л.55об].



Образцы экспериментальных гальванографических работ. Эти изображения сохранились среди бумаг Б.С.Якоби. Кто над ними работал — неизвестно. Существует предположение, что мастером-гальваником был или помощник Б.С.Якоби, или герцог Лейхтенбергский [3, ф.187, оп.1, д.37, л.5, 6].

гом Лейхтенбергским, были использованы при печатании новых российских денежных знаков.

В январе 1842 г. Якоби представил Академии наук несколько новых гальванографических образцов, полученных герцогом Лейхтенбергским [11]. В течение 1840–1841 гг. Его Высочество обрабаты-

вал технику получения оригинального рисунка, отличающегося от гравюр на меди и дереве. Его метод заключался в том, чтобы надписи и изображения на металлических пластинках делались тушью. Летом 1841 г. в Царском Селе он поставил еще один успешный опыт, позволяющий получить выпуклый рисунок для последующего оттиска путем гальванического выжигания не покрытой рисунком части металлической пластины. В ходе работ были зафиксированы и наблюдения над пока не объясненным физическим явлением — осаждением меди на поверхностях, не проводящих электричества.

Когда осенью 1842 г. герцог Лейхтенбергский с супругой отправился в Европу, Якоби рекомендовал его известным ученым, в чьих лабораториях Его Высочество мог познакомиться с новейшими достижениями электрической химии. Поездка имела целью поправку здоровья великой княгини Марии Николаевны, и поэтому герцог смог увидеть встречи с учеными лишь малую часть времени. В Мюнхене он пробыл всего несколько дней, а в Женеву и вовсе отправил своего секретаря, который встретился с физиком А.О.де ла Ривом*, работавшим над созданием гальванического локомотива и расспрашивавшим гостя о лодке Якоби**. В Вене герцог беседовал с университетским профессором К.Шу***, который *рассказал о том, какие усовершенствования он привнес в использование дагерротипа, и о Берре****, его новом способе травления... дагерротипов.* <...>

К сожалению, уважаемый ученый смог показать это достижение Его Высочеству лишь один или два раза и был принужден (подчиняясь приказу властей, которые запретили ему публичную демонстрацию своих опытов) умолчать о том, какие кислоты он использует. Кажется, именно та-

* Артур Огюст де ля Рив (1801–1873) — швейцарский физик, исследователь в области электромагнетизма, электрохимии.

** По-видимому, имеются в виду опыты Якоби по практическому применению электромагнитного двигателя, производившиеся в Санкт-Петербурге в 1838–1841 гг.

*** Карл Шу (1806–1863) — австрийский естествоиспытатель (ботаник, энтомолог), популяризатор науки.

**** Кристиан Жозеф Берре (1796–1844) — австрийский естествоиспытатель, врач, анатом; основоположник микрофотографии (делал микроснимки с помощью дагерротипии).

le projectile comme une sphère homogène; ainsi, la seule supposition d'une très petite excentricité, admise par Poisson, rend la question incomparablement plus facile; mais aussi cette supposition ne s'applique pas au cas des obus rectifiés qui est si important à considérer.

D'après les hypothèses précédemment admises, et sans rien y supposer de plus, nous avons formé, par les principes de la dynamique, les équations différentielles relatives au mouvement des corps sphériques hémisphériques dans l'air. Ces équations sont au nombre de six; trois se rapportent au mouvement de translation, et trois au mouvement de rotation. On y découvre que le centre d'inertie se trouve sollicité par une force dont l'expression est la somme des deux premières puissances de la vitesse du centre de figure du modèle, chaque puissance étant accompagnée d'un coefficient que l'expérience doit faire connaître. Indépendamment de cette force, le centre d'inertie est sollicité encore par une autre, proportionnelle au produit de la vitesse et par le sinus de l'angle compris entre la direction de cette dernière vitesse et l'axe instantané de rotation. L'expression de la force dont il s'agit renferme d'ailleurs un coefficient inconnu. Ainsi, les équations de translation contiennent, en tout, trois coefficients qui y sont introduits par les hypothèses admises sur la pression et le frottement de l'air, et qu'on ne peut déterminer que par l'expérience.

Les équations relatives à la rotation sont plus compliquées; il serait même assez difficile d'en donner une idée nette, sans le secours des signes algébriques. Mais elles ne contiennent pas d'autre coefficient à déterminer par l'expérience que ceux dont nous venons de parler.

La forme de nos équations différentielles laisse peu d'espérance de les intégrer autrement que par la méthode des quadratures mécaniques. Nous nous proposons d'en entreprendre l'intégration par cette méthode, quand l'expérience aura fait connaître les coefficients inconnus, dont il a été question tout-à-l'heure et dont la connaissance doit précéder toute détermination numérique relative à la question qui nous occupe. Un de ces coefficients est celui qu'on retrouve dans les équations ordinaires de la balistique, où l'on ne considère pas le frottement de l'air. On s'accorde assez généralement à prendre $\frac{1}{2}$ pour la valeur de ce coefficient, mais il est possible que le frottement de l'air lui fasse subir quelques corrections.

Les deux autres coefficients peuvent se déduire de

l'observation du mouvement d'une sphère du même métal et du même degré de poli que le projectile que l'on considère, et notamment celui de ces deux coefficients, qui accompagnent la première puissance de la vitesse, dans l'expression de la première des deux forces qui sollicitent le centre d'inertie, et dont tout-à-l'heure il a été question, se déduira en faisant osciller la sphère comme un pendule, et se lui imprimant un très petit mouvement, afin qu'il ne fasse que des oscillations extrêmement petites. Le second coefficient peut être déterminé en donnant à la sphère une rotation très considérable et une vitesse de translation aussi petite que possible, et en observant avec exactitude les lois du mouvement ainsi communiqué.

Pour montrer l'usage de nos équations, nous avons considéré le tir de la carabine royale en belges; mais nous n'attachons aucune importance à cette application particulière, parce que nous y avons omis le frottement de l'air, faute de connaître la valeur des coefficients qui s'y rapportent, et parce que, par suite du chargement, les balles se déforment et s'écartent sensiblement de la forme que nous leur supposons, c'est-à-dire, de la forme sphérique.

NOTES.

G. EIN PAAR NEUE EXPERIMENTE DER GALVANO-PLASTIK, VON MAXIMILIAN, HERZOG VON LEUCHTENBERG (In le 7 août 1845).

No. 1.

Schon eine geraume Zeit des verfloffenen Winters mit einer Reihe galvanoplastischer Versuche beschäftigt, die mich zunächst praktisch und nachahmungsweise mit dem vertraut machten, was mir Professor Jacobi mitgeteilt hatte, erfuhr ich durch Professor v. Kobell, dass es ihm gelungen sey, über ein ganzes Bild oder eine Zeichnung in Tuschen eine Kupferplatte zu bilden, welche dann zum Abdrucke sich eignete. — Da mir Kobell's Versuche in sofern interessant schienen, als sie bewiesen, dass auch nicht leitende Linien-Flächen sich mit Kupfer überziehen, wenn sie von gut leitenden unterzogen und umgeben sind, so beschäftigte ich mich längere Zeit, und ich theile hier das Wesentliche mit. Das Geschehne wird auf einer blanken Platte von Silber oder Kupfer angefertigt. — Das Malen geschieht in einer Farbe, mit dem von den Porcellan-Malern gebrauchten, durch Ver-

NOTES.

3. VORLÄUFIGE ANZEIGE ÜBER NEUE GALVANISCHE BATTERIEN: VON MAXIMILIAN, HERZOG VON LEUCHTENBERG. Ehren-Mitglied der Kaiserlichen Akademie. (In le 7 mars 1845.)

Vor einigen Monaten errichtete ich hier in St. Petersburg eine Anstalt, in welcher Gegenstände aller Art galvanoplastisch verfertigt werden. Der Zweck dieser Anstalt ist, die in Russland gemachte Erfindung der Galvanoplastik, mit allen, seit ihrer Geburt gemachten Fortschritten, in ihrem Vaterlande zuerst im Grossen anzuwenden, und auf die höchste Stufe der artistisch-industriellen Vollendung zu bringen. Bei den deshalb mannichfaltig angestellten Versuchen und Arbeiten zeigte sich aber, dass bis hieher beobachtete Verfahren, welches bei Anfertigung von kleineren Gegenständen so vortheilhafte Dienste leistete, bei grossen nicht mehr dieselben Resultate gewährte. Ich sah mich daher gezwungen, in dem bisherigen bekannten Verfahren, verschiedene Aenderungen eintreten zu lassen. — Indem ich mir vorbehalte, über den ganzen Gang dieser Anstalt einer Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften später einen vollständigen Bericht zu geben, erlaube ich mir dieselbe vor der Hand von dem Resultate einiger von mir angestellten Versuche, die ich in Aenderung der bisher üblichen galvanischen Batterien vorgenommen, in Kenntnis zu setzen.

Bei Anwendung der Daniell'schen Batterie im Grossen zeigten sich einige Mängel. Die Amalgamirung des Zinks ist im Grossen beschwerlich und kostspielig, und ohne diese verlor sich das Zink in einer zu bedeutenden Masse, besonders, wenn man, wie es am häufigsten geschieht, verdünnte Schwefelsäure anwendet. Ausserdem liefert diese Batterie eine grosse Quantität Zinkvitriol, eine Substanz, die zum allgemeinen Gebrauche in grosser Menge wenig anwendbar ist, und daher nur geringen Vortheil darbietet würde.

Um also ein nutzbares Product zu erhalten, versuchte ich das Zink durch Eisen zu ersetzen, und verdünnte die Oberfläche sowohl, wie die Stärke der Säure. — Gleich die ersten Versuche gelangen, und bis jetzt sind diese Eisen-Batterien im Grossen in Anwendung, und das zweckmässigste Eisenvitriol verwendet sich mit Vortheil.

Zur Vergeltung benutze ich jedoch bis jetzt noch die Bagration'sche Exalibatterie. Bei Herrn Oberlieu-

tenant Jevreïeff fand ich eine von ihm dahin veränderte Bagration'sche Batterie, dass er die theuren Kohlenbatterien durch Coaks ersetzte. Ich versuchte diese Coaks-Zink-Batterie während 25 Stunden, und fand bei zwei, als Kette verbundenen Paaren mit einem gewöhnlichen Galvanometer Anfang 37° Abweichung, und nach 25 Stunden noch 23°. Da aber diese Batterie, im Grossen angewendet, so schön die sich wirkte, mit derselben Uebelstände zeigte, wie die Daniell'sche, so veränderte ich auch hier das Zink und ersetzte es durch Eisen; liess aber, wie in der Bagration'schen Batterie und in jener des Herrn Oberlieutenants Jevreïeff, die verdünnte Salpetersäure und die Schwefelsäure. Mit dieser Coaks-Eisen-Batterie aus zwei Paaren zeigte die Galvanometer 28°. Ein Versuch auf Vergeltung gelang in 1 1/2 Stunden ganz vorzüglich, und nach 25 Stunden zeigte die Magnetnadel noch 29°.

Doch auch diese Batterie hatte in meinen Augen Nachteile, die ich zu beseitigen wünschte. Die durch die Salpetersäure erzeugten Gase sind unangenehm, und nützen im Grossen sogar schädlich werden. — Es ergab sich durch eine Analyse, dass das Eisenvitriol eine nicht unbedeutende Quantität Salpetersäure enthält, welche den Verbrauch des Vitriols erschwerete, oder eine Zersetzung der Flüssigkeit bedingte.

Ich kam daher auf den Gedanken die Salpetersäure ganz wegzulassen, und bloss Schwefelsäure anzuwenden. Dadurch entstand eine neue Batterie, eine Coaks-Eisen-Batterie mit einer Flüssigkeit. Ich versuchte mit zwei Paaren, und erhielt eine Abweichung der Magnetnadel von 28°, und nach 25 Stunden 17°.

Bei allen hier erwähnten Versuchen waren Quantum und Stärke der das positive Metall umgebenden Flüssigkeiten, so wie Oberfläch der Elemente gleich. Ich wollte die Stärke der letzten Batterie noch vergrössern, und versuchte mit drei Paaren, wobei die Säure der Coaks 27° und die des Eisens 10° nach Baromé zeigte. Die Magnetnadel zeigte 50°, und ein Gegenstand vergoldete sich (im wahren Sinne des Wortes) augenblicklich.

Diese Batterie, die ich hinsichtlich der ihr noch mangelnden Batterien den grossen Vortheil, dass deren Unterhalt weniger Kosten verursacht, als Schwefelsäure und Eisen ein Product hervorbringen, welches seine eigenen Kosten hinlänglich deckt, und Coaks stets den Werth als Brennmaterial behält.

Ich bin nun im Begriffe mit allen bisher bekannten Batterien genaue Versuche zu machen, und werde nicht ermangeln, diese seiner Zeit einer Kaiserlichen

Времена и люди

Первая страница сообщения герцога Лейхтенбергского «Два новых гальванопластических опыта» (Bulletin scientifique publié par l'Académie Imperiale des sciences de Saint-Petersbourg. 1841; VIII(9): 140–144).

Первая страница публикации герцога Лейхтенбергского «Предварительное объявление о новой гальванической батарее» (Bulletin de la physico-mathématique de l'Académie des sciences de St.-Petersbourg. 1845; IV(4–5): 69–71).



Портрет мальчика. Оригинальное изображение (слева) и его гальванокопия. [3, ф.187, оп.1, д.37, л.2, 3].

ким способом Берре удалось сделать банкноты столь высокого качества, что они прошли все ступени контроля; опасность этого изобретения побудила правительство засекретить его. Рассказывая Якоби о европейских впечатлениях, секретарь герцога резюмировал: Мы смогли убедиться, что повсюду... процесс золочения и серебрения с помощью гальванического элемента стал необыкновенно популярен. Покинув стены университетских и исследовательских лабораторий, он шагнул в производственные цеха [3, ф.187, оп.1,

д.1, л.462об.–463]. По возвращении в Россию герцог Лейхтенбергский представил Якоби четыре листа эстампов, выполненных в Мюнхене по методу Кобелла, и академик в свою очередь продемонстрировал их в Академии наук как пример высокой степени совершенства, до которой доведен этот полезный метод [3, ф.1, оп.1а, д.68, л.106об.].

О работах герцога Максимилиана Лейхтенбергского в области гальванопластики см. статью Е.Н.Груздевой «Артистическая бронза» герцога Лейхтенбергского» в следующем номере журнала. ■

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-03-00212а).

Литература / References

1. Полное собрание законов Российской империи. Первое собрание (1649–1825). Т.28 (1804–1805): 174–175. №21.423а от 16 августа 1804 г. [Complete Collection of Laws of the Russian Empire. Ed.I (1649–1825). V.28 (1804–1805): 174–175. №21.423а, August 16 1804. (In Russ.)]
2. Полное собрание законов Российской империи. Второе собрание (1825–1881). Т.6 (1831). Ч.2: С.303. №5013 от 13 декабря 1831 г. [Complete Collection of Laws of the Russian Empire. Ed.II (1825–1881). V.6 (1831). Pt.2: 303. №5013, December 13 1831. (In Russ.)]
3. Санкт-Петербургский филиал Архива РАН. [Saint-Petersburg Branch of the Archive of the RAS. (In Russ.)]
4. *Leuchtenberg M. Herzog v. Beschreibung einiger neuen Thierreste der Urwelt aus den Silurischen Kalkschichten von Zarskoje Selo. St.-Petersburg, 1843.*
5. Центральный государственный исторический архив Санкт-Петербурга. [Central State Historical Archive of St.-Petersburg (In Russ.)]
6. Российский государственный исторический архив. [Russian State Historical Archive. (In Russ.)]
7. *Hochleitner R. The Duke Leuchtenberg Collection in the Mineralogical State Collection, Munich. In the Mineral Observer: Mineralogical Alamanac. 2010; 15(3): 30–39.*
8. Переписка цесаревича Александра Николаевича с императором Николаем I: 1838–1839. М., 2008; 107. [Correspondence of Grand Duke Alexander Nikolaevich with Emperor of Russia Nicholas I: 1838–1839. М., 2008; 107. (In Russ.)]
9. Исторический очерк деятельности Корпуса военных топографов. 1822–1872. СПб., 1872. [History Essay about the Corps of Topographers. 1822–1872. St.-Petersburg, 1872. (In Russ.)]
10. *Спасский И.Г. Первые годы гальванопластики в России. Якоби Б.С. Работы по электрохимии. М.; Л., 1957: 228–229. [Spassky I.G. The First Years of Electrotyping in Russia. Jacobi B.S. Essays about Electrochemistry. Moscow; Leningrad, 1957: 228–229. (In Russ.)]*
11. *Якоби Б.С. Доклад о гальванопластике. Якоби Б.С. Работы по электрохимии. М.; Л., 1957; 106–109. [Jacobi B.S. Report on Galvanography. Jacobi B.S. Essays about Electrochemistry. Moscow; Leningrad, 1957; 106–109. (In Russ.)]*

Honorary Member of the Imperial Academy of Sciences Duke Maximilian of Leuchtenberg

E.N.Gruzdeva

Saint-Petersburg Branch of the Archive of the Russian Academy of Sciences (Saint Petersburg, Russia)

In the first half of the 19th century, the Imperial St.-Petersburg Academy of Sciences used to elect the people remote from science as its honorary members: viz. statesmen and military leaders, noblemen and senior officials, members of the Imperial family, etc. As a result, that highest rank became small change in the Imperial policy not an award of the Academy to recognize one's achievements in science. There were honoured Kings Frederick William III and IV of Prussia, King Christian VIII of Denmark, King Oscar I of Sweden and Norway, Emperor Nicholas I of Russia, his brother and sons; e.g., Grand Duke Alexander Nikolaevich of Russia was elected honorary member when he was eight. Most of them didn't have any bearing on science at all. The election of Maximilian of Leuchtenberg as an honorary member of the Academy of Sciences seemed to be the exception to the rule. His keen interest in scientific experiments, intellectual curiosity and great talent for management favoured the research into electrochemistry and the practical use of galvanic technologies as well.

Keywords: Maximilian of Leuchtenberg, Imperial St.Petersburg Academy of Sciences, honorary member of the Academy, electrochemistry, electrotyping, galvanography.