

УДК 593.95-11

**ЦИРКОНЫ И ТИТАНОМАГНЕТИТЫ
МОРСКОГО ЕЖА *SCAPHECHINUS GRISEUS* (MORTENSEN, 1927)
(ECHINODERMATA: ECHINOIDEA: SCUTELLOIDA)**

© 2026 г. Ю. Н. Елькин¹, С. О. Максимов², А. А. Бегун³

¹Тихоокеанский институт биоорганической химии имени Г. Б. Елякова ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация

³Национальный научный центр морской биологии имени А. В. Жирмунского ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация

E-mail: andrejbegun@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.07.2024; после доработки 18.11.2024;
принята к публикации 21.11.2025.

Морские ежи, представители подотряда Scutelloida, накапливают в дивертикулах минеральные частицы песчаного субстрата. Молодые особи *Scaphechinus mirabilis* A. Agassiz, 1864 выбирают и накапливают кристаллы только очень редких минералов — циркона и ильменита. В данной работе впервые определены минералы в дивертикулах родственного вида, *Scaphechinus griseus* (Mortensen, 1927), обитающего совместно с *S. mirabilis* в песчаном субстрате у южного побережья острова Русский (Японское море). Их сосуществование обусловлено общей структурой питания, включающей диатомовые водоросли и, возможно, неорганические соединения. Состав минералов в дивертикулах оказался одинаковым для двух видов рода *Scaphechinus* A. Agassiz, 1864. Проведённый анализ показал приоритет отбора циркона видом *S. mirabilis* в сравнении с *S. griseus*. Содержание оксидов минералов в донных отложениях в местах пробоотбора было небольшим. Установлено, что основной органический корм исследуемых ежей из придонного морского субстрата — диатомовые водоросли, представленные 17 видами из классов Coscinodiscophyceae (4 вида), Fragilariophyceae (2) и Bacillariophyceae (11). Среди них количественно преобладали одиночно живущие морские бентосные формы, *Navicula dumontiae* Baardseth et Taasen, 1973 ($128 \cdot 10^3$ кл.·см⁻³), и оседающие из пелагиали планктонные, *Asterionella formosa* Hassall, 1850 ($106 \cdot 10^3$ кл.·см⁻³). Обилие диатомей ($245 \cdot 10^3$ кл.·см⁻³) в прибрежных донных осадках в местах обитания морских ежей может способствовать успешному развитию в Японском море этих двух эндемичных видов эхиноидей. Полученные данные существенны для расширения знаний о трофических предпочтениях двух родственных видов морских ежей, обитающих под поверхностью песчаного морского дна.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, минералы, циркон, ферротитан, дивертикул, морской ёж

Зарывающиеся морские ежи (Echinodermata: Echinoidea: Scutellidae) занимают нишу песчаных субстратов морского дна ниже приливно-отливной зоны. Благодаря множеству хеморецепторов на кулачках определённых микроскопических игл и ножках-трубочках на обеих сторонах слегка вогнутого дискоидного эндоскелета, ежи способны распознавать вес, размер и химическую природу кормовых частиц до того, как они будут перенесены в кишечник [Ghiold, 1983]. Ежи потребляют мейобентос и детрит вместе с минеральными частицами из окружающего песчаного

субстрата [Ellers, Telford, 1984]. У животных подотряда Scutelloida имеется объёмный дивертикул, в котором они накапливают отобранные минеральные зёрна [Zachos, Ziegler, 2024; Ziegler, Barr, 2018]. Депозит наиболее тяжёлых минералов железа и оксидов кремния, широко распространённых в донных отложениях, исследователи связывали с созданием «весового пояса» у морских ежей в подвижном донном песке [Chia, 1973]. Позже появились сомнения в назначении данного балласта [Chen, Chen, 1994]. Обсуждение выявленного несоответствия привело к выводу, что способность представителей *Scaphechinus* A. Agassiz, 1864 отбирать минеральные зёрна из донных отложений для формирования «весового пояса» является результатом эволюционного развития большинства видов этого рода [Mooi, Chen, 1996]. В этой работе отмечено также, что дивертикулы крупных представителей Scutelloida — *Scaphechinus mirabilis* A. Agassiz, 1864 и *Scaphechinus griseus* (Mortensen, 1927) — были заполнены мелким песком и кристаллами (их минеральный состав остался неизвестным). Позже было установлено, что в дивертикуле *S. mirabilis* накоплен только циркон (85 объёмных %) и ильменит (15 объёмных %), хотя содержание зёрен этих минералов в донном субстрате составляло сотые доли объёмных %, то есть было на четыре порядка меньше [Елькин и др., 2012]. Возник вопрос и о возможностях ежа распознавать цирконы и ильмениты (класс железо-титановых оксидов) в донных отложениях. Способность животного сортировать минералы в кишечнике с помощью перистальтического дивертера прямой кишки и направлять их в дивертикулы выявлена ранее [Zachos, Ziegler, 2024]. Феномен требует изучения: необходимо определить неизвестные причины, дающие возможность молодежи *S. mirabilis* выбирать и дважды сортировать перед аккумулярованием именно эти редкие минералы (циркон в приоритете) из окружающего субстрата.

Появление новых знаний о физиологии морского ежа *S. mirabilis* обусловило интерес к анализу минералов из дивертикулов родственного вида, *S. griseus*, в пределах того же биогеоценоза, с использованием *S. mirabilis* в качестве «внутреннего стандарта». К сожалению, *S. griseus* не формирует популяций в донных отложениях бухты Холерная Японского моря, где были собраны изученные ежи *S. mirabilis* (вблизи разрушающихся пермских гранодиоритов Гамовского массива) [Елькин и др., 2012]. Обнаруженное сосуществование двух видов ежей в районе южного побережья острова Русский, где обнажаются пермские гранитные образования, дало возможность проанализировать минералы, накапливаемые *S. griseus*.

Цель настоящего исследования — определить состав минералов, накапливаемых *Scaphechinus griseus*, что необходимо для понимания предпочтений при выборе минералов, феномена их отбора, особенностей накопления и их роли в физиологии морского ежа.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили морские ежи *S. mirabilis* и *S. griseus* (средний размер — 45 и 30 мм соответственно). По 11 экз. каждого вида собраны 31 октября 2013 г. в бухте Новый Джигит (южная часть острова Русский Японского моря) (N42.95°, E131.85°) на глубине 5–6 м (рис. 1). Проба донных осадков вместе с морскими ежами отобрана водолазами в точке обитания животных с верхнего 10-см слоя песка пластиковым стаканом объёмом 30 см³. Аналогичным образом одновременно отобрана проба донных осадков в бухте Холерная (залив Посьета Японского моря) с верхнего 10-см слоя песка на глубине 5 м. Животных фиксировали 96%-ным этанолом с последующим высушиванием на воздухе. Под бинокулярным микроскопом вручную извлекали минеральные зёрна из дивертикулов ежей. Донные осадки, представляющие собой мелкозернистый песок, также высушивали и просеивали на стандартных ситах (> 0,063 и < 0,2 мм) для получения мелкой фракции минералов, по размеру аналогичной потребляемой этими животными. Отделение фракции тяжёлых минералов проводили осаждением в тетрабромметане (удельный вес — 5 г·см⁻³), разбавляя его ацетоном. Титаномагнетиты из тяжёлой фракции

извлекали магнитом. Методика отделения, извлечения и идентификации минералов описана ранее [Елькин и др., 2012]. Минеральные зёрна определяли под бинокулярным световым микроскопом Jenaval (Carl Zeiss, Германия) при увеличении от 40х до 400х. Объёмные концентрации идентифицированных минералов рассчитывали по их известным удельным весам.

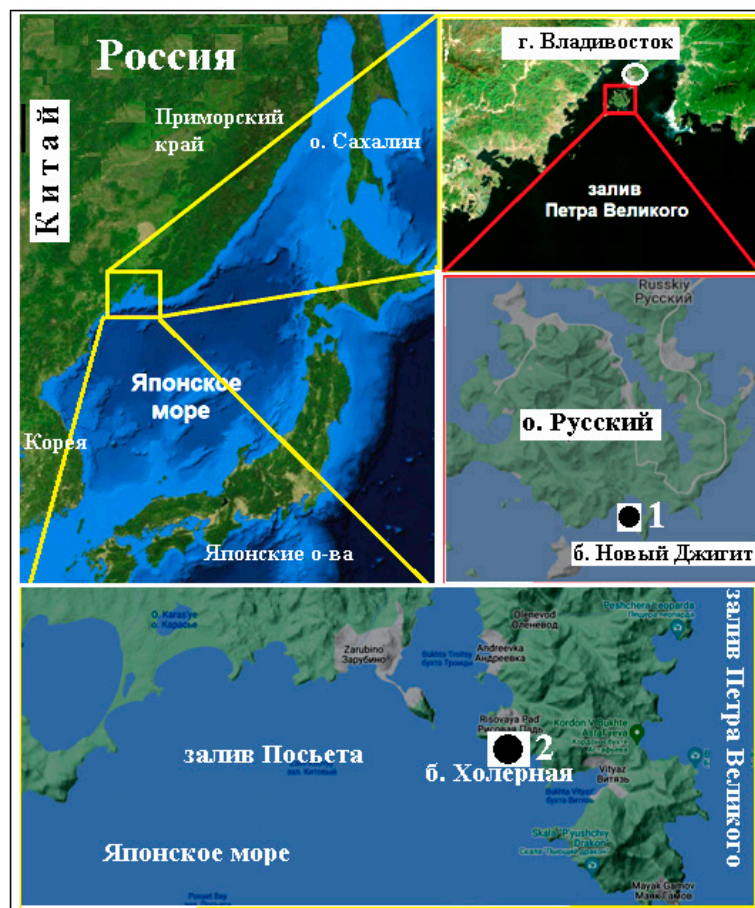


Рис. 1. Карта-схема района исследования. Точками обозначены места отбора проб морских ежей и донного грунта в бухтах Новый Джигит (1) и Холерная (2) Японского моря

Fig. 1. Schematic map of the study area. The dots mark sites of sampling of sea urchins and bottom sediment in the Novy Dzhigit Bay (1) and Kholernaya Bay (2) of the Sea of Japan

Для определения видового состава и численности диатомовых водорослей пробу песчаного грунта отмывали фильтрованной морской водой, суспендировали и фиксировали 4%-ным раствором формалина. Затем суспензию профильтровывали на 80-мкм капроновом фильтре Nitex (Sefar, Швейцария). Фракции этих смывов концентрировали методом осаждения до 4–5 мл. Камеральную и микроскопическую обработку материала проводили согласно методикам, описанным ранее [Рябушко, Бегун, 2015]. Микроводоросли определяли под световым микроскопом проходящего света Olympus BX41 с объективом UPLanF1 100х/1.30 (Япония). Для идентификации некоторых видов Bacillariophyta использовали постоянные препараты и традиционные методы очистки панцирей [Диатомовые водоросли СССР, 1974]. Видовой состав диатомей уточняли с помощью сканирующего электронного микроскопа Sigma 300 VP (Германия). Клетки микроводорослей подсчитывали в камере Горяева объёмом 0,9 мл, в пяти повторностях; численность клеток рассчитывали на 1 см³ донных осадков. Видовую принадлежность устанавливали с использованием ряда определителей и атласов, указанных в монографии [Рябушко, Бегун, 2015]. Список водорослей составлен в соответствии с ресурсом AlgaeBase [2026].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты анализа минералов в донном песке и дивертикулах морских ежей *S. mirabilis* и *S. griseus* показаны в табл. 1. Количество ферротитановых минералов (титаномагнетит и ильменит) в среде обитания этих видов в бухте Новый Джигит оказалось в 5–6 раз больше, чем таковое в ранее изученной бухте Холерная [Елькин и др., 2012], а количество циркона, наоборот, немного меньше. Минеральный состав отложений из проб, отобранных вблизи острова Русский и в бухте Холерная, отличается только по количественному соотношению титаномагнетита и ильменита. Животные обоих видов выбирали 4 из 11 минералов размерной фракции 0,063–0,2 мм. Состав минералов, накопленных ежами двух видов, идентичен, однако у *S. griseus* 5/6 минералов составляли титаномагнетиты и только 1/6 — циркон. Превалирование титаномагнетитов в дивертикулах обоих видов ежей, по-видимому, обусловлено высоким содержанием этих минералов в отложениях. Тот факт, что доля лёгких минералов в дивертикулах составляет всего 7–10 объёмных %, может объясняться стрессом морских ежей из-за высокой волновой активности в районе обитания.

Таблица 1. Состав минеральных частиц в донных осадках в зоне обитания морских ежей *Scaphechinus mirabilis* и *S. griseus* и в их дивертикулах, объёмные %

Table 1. Composition of mineral particles of bottom sediments in the habitat of sea urchins *Scaphechinus mirabilis* and *S. griseus* and in their diverticula, volume %

Минерал ($\leq 0,2$ мм)	Донные осадки	<i>Scaphechinus mirabilis</i>	<i>Scaphechinus griseus</i>
Кварц, полевой шпат	69,3	5,5	7,0
Скальные обломки	26,8	2,6	2
Амфибол	0,87		
Слюда	0,99		
Эпидот	1,9	1,4	1,0
Титаномагнетит	0,057	4,5	12,0
Ильменит	0,052	40,4	64,0
Циркон	0,001	45,6	14,0
Андалузит	0,006		
Кордиерит	0,004		
Титанит	0,011		

Анализ донного песка в районе местообитания морских ежей *S. mirabilis* и *S. griseus* показал наличие в нём 17 видов диатомовых водорослей из классов Coscinodiscophyceae (4 вида), Fragilariophyceae (2) и Bacillariophyceae (11): *Actinoptychus senarius* (Ehrenberg) Ehrenberg, 1843; *A. vulgaris* f. *vulgaris* Schumann, 1867; *Asterionella formosa* Hassall, 1850; *Delphineis surirella* (Ehrenberg) G. W. Andrews, 1981; *Diploneis smithii* (Brébisson) Cleve, 1894; *Fogedia finmarchica* (Cleve & Grunow) Witkowski, Metzeltin & Lange-Bertalot, 1977; *Halamphora cuneata* (Cleve) Levkov, 2009; *Lyrella clavata* (Gregory) D. G. Mann, 1990; *Lyrella lyra* (Ehrenberg) Karajeva, 1978; *L. spectabilis* (W. Gregory) D. G. Mann, 1990; *Navicula dumontiae* Baardseth et Taasen, 1973; *N. cancellata* var. *retusa* (Brébisson) Cleve, 1895; *N. perrhombus* Hustedt ex Simonsen, 1962; *Odontella aurita* (Lyngbye) C. Agardh, 1832; *Petroneis monilifera* (Cleve) A. J. Stickle & D. G. Mann, 1990; *Plagiogramma staurophorum* (W. Gregory) Heiberg, 1863 и *Plagiogrammopsis vanheurckii* (Grunow) Hasle, Stosch & Syvertsen, 1983 (рис. 2). Общая плотность поселения диатомей в песке составляла $245 \text{ кл.}\cdot\text{мл}^{-1}$; доминировали бентосный вид *N. dumontiae* (59 %) и планктонный *A. formosa* (25 %).

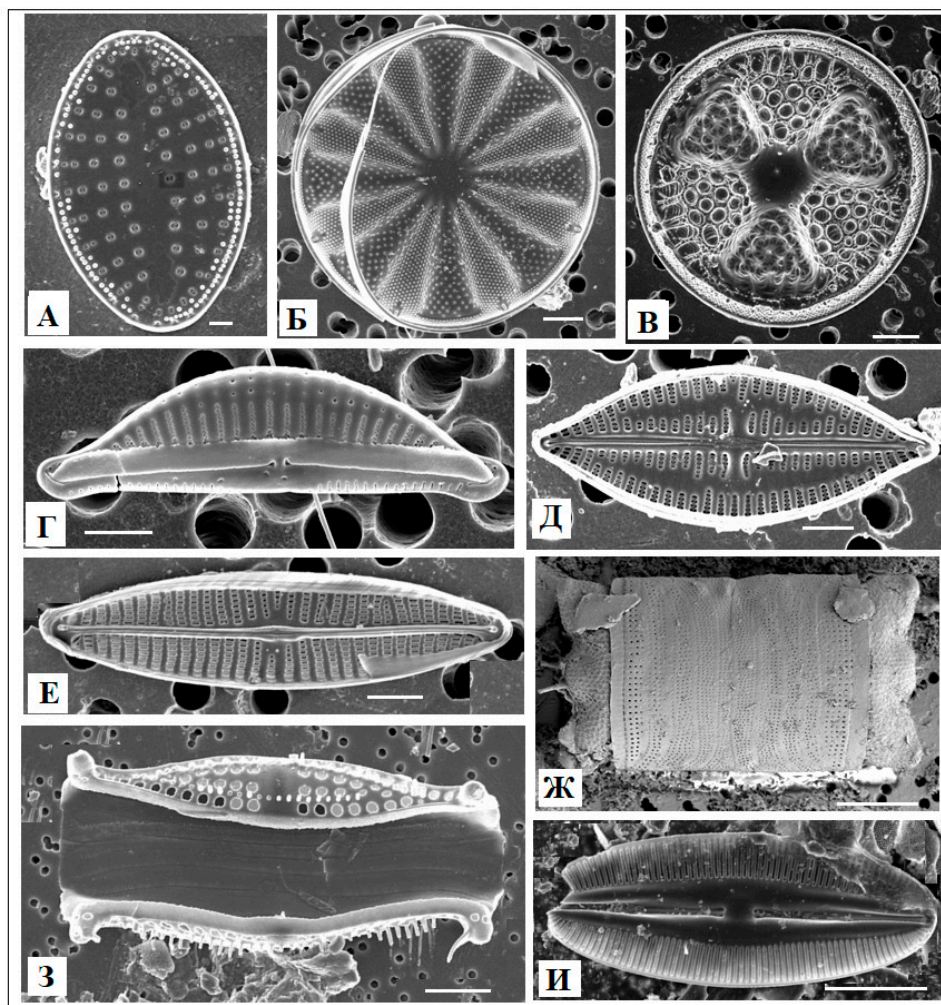


Рис. 2. Диатомовые водоросли донного песка в районе местообитания морских ежей *Scaphechinus mirabilis* и *S. griseus* (сканирующий электронный микроскоп): А — *Delphineis surirella*; Б — *Actinoptychus vulgaris* f. *vulgaris*; В — *A. senarius*; Г — *Halamphora exigua*; Д — *Fogedia finmarchica*; Е — *Navicula dumontiae*; Ж — *Odontella aurita*; З — *Plagiogrammopsis vanheurckii*; И — *Diploneis smithii*. Масштабная линейка — 1 мкм (А), 4 мкм (Б), 2 мкм (В–Ж) и 10 мкм (З, И)

Fig. 2. Diatoms in bottom sand in the habitat of sea urchins *Scaphechinus mirabilis* and *S. griseus* (a scanning electron microscope): А, *Delphineis surirella*; Б, *Actinoptychus vulgaris* f. *vulgaris*; В, *A. senarius*; Г, *Halamphora exigua*; Д, *Fogedia finmarchica*; Е, *Navicula dumontiae*; Ж, *Odontella aurita*; З, *Plagiogrammopsis vanheurckii*; И, *Diploneis smithii*. Scale bars are 1 μm (А), 4 μm (Б), 2 μm (В–Ж), and 10 μm (З, И)

ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на разницу в количественном содержании ферротитанов, морской ёж *S. mirabilis* продемонстрировал значительный консерватизм в выборе кристаллов [Dawkins, 1982]: в его дивертикуле обнаружено до 45 объёмных % циркона и столько же титаномагнетита. При этом минералов обоих типов в донных отложениях оказалось на 4 порядка меньше.

Сравнительный анализ минералов, особенно циркона, в дивертикулах исследуемых видов ежей позволяет предположить их вовлечённость в физиологические процессы *Scutelloida*. Феномен агглютинации циркона и ильменита известен также для протистов [Capotondi et al., 2019; Sabbatini et al., 2016] из осадков Адриатики. Мы предположили, что процессы, приводящие к накоплению кристаллов у простейших, могут иметь сходство с процессами, протекающими на коллагеновой поверхности кулачка миллиаровых игл *Scutelloida*. Возможно, существует и некая

неизвестная на сегодняшний день связь между электрохимическими и физическими свойствами кристаллов циркона и биохимическими и физиологическими процессами у протистов и морских ежей — далёких друг от друга в эволюционном развитии обитателей морского дна. Речь идёт о предполагаемой роли циркона в физиологии питания морского ежа *S. mirabilis* с учётом его видоспецифичного кишечного микробиома, участвующего в биовыщелачивании минеральных элементов, например К, Р, Ag и Fe [Елькин и др., 2013]. С другой стороны, накопление минералов, геохимически родственных элементам Zr и Ti, может быть обусловлено пока неизвестной их ролью в катализе биохимических процессов в дивертикулах морских ежей [Pinsino et al., 2015].

Фации морского дна при отсутствии речного стока оказались также бедны растительным и водорослевым детритом. Однако в «прибойной мельнице» береговой гальки выше исследованного места отбора ежей обитают донные диатомовые водоросли — основная группа микроскопических автотрофных организмов [Martin, Quigg, 2012]. Также донные фации являются местом оседания планктонных диатомей в результате активной гидродинамики, из-за чего в морском прибрежье фитопланктон и микрофитобентос связаны в один эколого-флористический комплекс [Рябушко, Бегун, 2015]. Важно отметить следующее: кроме диатомовых водорослей, пищевой спектр *S. mirabilis* и *S. griseus* охватывает мейобентос; это было определено путём сравнения темпов роста молодых ежей вблизи устья реки и вдали от него [Брыков, Парыгина, 1979].

Ранее проведённое вблизи устья реки Волчанка (залив Восток Японского моря) исследование морского ежа *Echinarachnius parma* (Lamarck, 1816), занимающего одну экологическую нишу с *S. mirabilis* и *S. griseus* [Рябушко, Бегун, 2015], показало наличие в его кишечнике диатомовых водорослей, относящихся к 22 таксонам. Среди них были виды родов *Plagiogramma* R. K. Greville, 1859, *Navicula* J. V. M. Bory de Saint-Vincent, 1822, *Lyrella* N. I. Karayeva, 1978, *Halamphora* (Cleve) Z. Levkov, 2009 и *Diploneis* (C. G. Ehrenberg) P. T. Cleve, 1894, преимущественно бентосные. Несколько из зарегистрированных в указанной работе видов были найдены и нами при изучении песчаного донного грунта бухты Новый Джигит острова Русский. Как известно, для диатомей характерно высокое содержание ценных липидов, к примеру длинноцепочечных полиненасыщенных и мононенасыщенных жирных кислот, полярных липидов, триглицеридов, стероидов и оксипиринов [Мальцев и др., 2023; Yi et al., 2017]. Это определяет высокую пищевую ценность диатомовых водорослей для морских ежей в сублиторальном биотопе морей. Диатомеи, наряду с детритом и остатками макроводорослей и морских трав, являются основными компонентами органического питания *S. mirabilis* и *S. griseus* [Telford et al., 1983]. Возможно, необходимые для питания минеральные элементы морские ежи получают из кристаллов циркона и титаномагнетита, накапливающихся в их дивертикулах. Донный субстрат, в котором обитают *S. mirabilis* и *S. griseus*, состоит из разрушенных гранитоидных формаций берега, включающих данные минералы.

Заключение. Впервые определены минералы в дивертикулах зарывающихся морских ежей *Scaphechinus griseus* и *S. mirabilis*, совместно обитающих на песчаном субстрате у южного побережья острова Русский Японского моря. Установлено, что оба вида накапливают в дивертикулах исключительно редкие в субстрате морского дна минералы — цирконы и титаномагнетиты, причём *S. mirabilis* в основном аккумулирует циркон. Предположительно, одним из компонентов минерального питания для Echinodermata выступают кристаллы терригенного происхождения, накапливающиеся в дивертикулах этих видов ежей. В органическом питании *S. mirabilis* и *S. griseus* важную роль играют диатомовые водоросли. В месте обитания ежей выявлено относительно высокое обилие Bacillariophyta, что может быть рассмотрено как один из факторов их приуроченности к данному биотопу. Результаты исследования важны для понимания особенностей трофических предпочтений двух родственных видов морских ежей.

Работа выполнена на базе ЦКП РК «Морской биобанк» ННЦМБ ДВО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 124021900009-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Брыков В. А., Парыгина А. С. Количественные характеристики роста плоского морского ежа *Scaphechinus mirabilis* // *Биология моря*. 1979. № 4. С. 20–25. [Brykov V. A., Parygina A. S. Quantitative growth characteristics of the sand dollar *Scaphechinus mirabilis*. *Biologiya morya*, 1979, no. 4, pp. 20–25. (in Russ.)]
2. *Диатомовые водоросли СССР. Ископаемые и современные*. Т. 1 / отв. ред. А. И. Прошкина-Лавренко. Ленинград : Наука, Ленингр. отд-ние, 1974. 403 с. [*The Diatoms of the USSR. Fossil and Recent*. Vol. 1 / A. I. Proshkina-Lavrenko (Ed.). Leningrad : Nauka, Leningr. otd-nie, 1974, 403 p. (in Russ.)]
3. Елькин Ю. Н., Максимов С. О., Сафронов П. П., Зверева В. П., Артюков А. А. Селективное накопление цирконов и ильменитов в дивертикулах морского ежа *Scaphechinus mirabilis* (Agazzis, 1863) // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 446, № 1. С. 114–117. [Elkin Y. N., Maksimov S. O., Safronov P. P., Zvereva V. P., Artyukov A. A. Selective accumulation of zircons and ilmenites in diverticula of the sea urchin *Scaphechinus mirabilis* (Agazzis, 1863). *Doklady Akademii nauk*, 2012, vol. 446, no. 1, pp. 114–117. (in Russ.)]. <https://elibrary.ru/pbwfid>
4. Елькин Ю. Н., Сафронов П. П., Артюков А. А., Карабцов А. А. Деструкция минералов морского дна в кишечнике плоского морского ежа *Scaphechinus mirabilis* A. Agassiz, 1863 (Echinodea: Scutellidae) // *Доклады Академии наук*. 2013. Т. 453, № 4. С. 461–465. [Elkin Y. N., Safronov P. P., Artyukov A. A., Karabtsov A. A. Destruction of seabed minerals in the intestine of the sand dollar *Scaphechinus mirabilis* A. Agassiz, 1863 (Echinodea: Scutellidae). *Doklady Akademii nauk*, 2013, vol. 453, no. 4, pp. 461–465. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/s0869565213340240>
5. Мальцев Е. И., Кривова З. В., Мальцева С. Ю., Куликовский М. С. Разнообразие жирных кислот диатомовых водорослей // *Вопросы современной альгологии*. 2023. № 2 (32). С. 189–191. [Maltsev Ye. I., Krivova Z. V., Maltseva S. Yu., Kulikovskiy M. S. Fatty acids diversity of diatoms. *Voprosy sovremennoi al'gologii*, 2023, no. 2 (32), pp. 189–191. (in Russ.)]. [https://doi.org/10.33624/2311-0147-2023-2\(32\)-189-191](https://doi.org/10.33624/2311-0147-2023-2(32)-189-191)
6. Рябушко Л. И., Бегун А. А. *Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря*. Севастополь ; Симферополь : Н.Орианда, 2015. Т. 1. 288 с. [Ryabushko L. I., Begun A. A. *Diatoms of Microphytobenthos of the Sea of Japan*. Sevastopol ; Simferopol : N.Orianda, 2015, vol. 1, 288 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/7924>
7. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway / M. D. Guiry, G. M. Guiry (Eds) : [site], 2026. URL: <http://www.algaebase.org> [accessed: 21.01.2026].
8. Capotondi L., Mancin N., Cesari V., Dinelli E., Ravaioli M., Riminucci F. Recent agglutinated foraminifera from the North Adriatic Sea: What the agglutinated tests can tell. *Marine Micropaleontology*, 2019, vol. 147, pp. 25–42. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2019.01.006>
9. Chen C.-P., Chen B.-Y. Diverticulum sand in a miniature sand dollar *Sinaechinocyamus mai* (Echinodermata: Echinoidea). *Marine Biology*, 1994, vol. 119, iss. 4, pp. 605–609. <https://doi.org/10.1007/bf00354324>
10. Chia F.-S. Sand dollar: A weight belt for juveniles. *Science*, 1973, vol. 181, no. 4094, pp. 73–74. <https://doi.org/10.1126/science.181.4094.73>
11. Dawkins R. *The Extended Phenotype. The Gene as the Unit of Selection*. Oxford ; San Francisco : W. H. Freeman, 1982, 307 p.
12. Ellers G., Telford M. Collection of food by oral surface podia in the sand dollar, *Echinarachnius parma* (Lamarck). *Biological Bulletin*, 1984, vol. 166, no. 3, pp. 574–582. <https://doi.org/10.2307/1541163>
13. Ghiold J. The role of external appendages in the distribution and life habits of the sand dollar *Echinarachnius parma* (Echinodermata: Echinoidea). *Journal of Zoology*, 1983, vol. 200, iss. 3, pp. 405–419. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1983.tb02319.x>
14. Martin R., Quigg A. Evolving phytoplankton stoichiometry fueled diversification

- of the marine biosphere. *Geosciences*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 130–146. <https://doi.org/10.3390/geosciences2020130>
15. Mooi R., Chen C.-P. Weight belts, diverticula, and phylogeny of the sand dollars. *Bulletin of Marine Sciences*, 1996, vol. 58, no. 1, pp. 186–195.
 16. Sabbatini A., Negri A., Bartolini A., Morigi C., Boudouma O., Dinelli E., Florindo F., Galeazzi R., Holzmann M., Lurcock P. C., Massaccesi L., Pawlowski J., Rocchi S. Selective zircon accumulation in a new benthic foraminifer, *Psammophaga zirconia*, sp. nov. *Geobiology*, 2016, vol. 14, no. 4, pp. 404–416. <https://doi.org/10.1111/gbi.12179>
 17. Telford M., Harold A. S., Mooi R. Feeding structures, behavior and microhabitat of *Echinocyamus pusillus* (Echinoidea: Clypeasteroidea). *Biological Bulletin*, 1983, vol. 165, no. 3, pp. 745–757. <https://doi.org/10.2307/1541476>
 18. Zachos L., Ziegler G. A. Selective concentration of iron, titanium, and zirconium substrate minerals within Gregory's diverticulum, an organ unique to derived sand dollars (Echinoidea: Scutelliformes). *PeerJ*, 2024, vol. 12, art. e17178. <https://doi.org/10.7717/peerj.17178>
 19. Yi Z., Xu M., Di X., Brynjolfsson S., Fu W. Exploring valuable lipids in diatoms. *Frontiers in Marine Science*, 2017, vol. 4, art. 17 (10 p.). <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00017>
 20. Ziegler A., Barr D. J. The historical and biographical context of Gregory's diverticulum, an unusual organ in sand dollars. *Breviora*, 2018, vol. 559, iss. 1, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3099/mcz47.1>
 21. Pinsino A., Russo R., Bonaventura R., Brunelli A., Marcomini A., Matranga V. Titanium dioxide nanoparticles stimulate sea urchin immune cell phagocytic activity involving TLR/p38 MAPK-mediated signalling pathway. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, iss. 1, art. 14492 (12 p.). <https://doi.org/10.1038/srep14492>

**ZIRCONS AND TITANOMAGNETITES
OF THE SEA URCHIN *SCAPHECHINUS GRISEUS* (MORTENSEN, 1927)
(ECHINODERMATA: ECHINOIDEA: SCUTELLOIDA)**

Yu. Elkin¹, S. Maksimov², and A. Begun³

¹G. B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

²Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

³A. V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

E-mail: andrejbegun@yandex.ru

Sea urchins, representatives of the suborder Scutelloida, accumulate in diverticula mineral particles of the sandy substrate. Juveniles of *Scaphechinus mirabilis* A. Agassiz, 1864 select and accumulate crystals of only very rare minerals: zircon and ilmenite. In this work, minerals in diverticula of the related species, *Scaphechinus griseus* (Mortensen, 1927), were determined for the first time. This species, the same as *S. mirabilis*, inhabits sandy substrate off the southern coast of the Russky Island (the Sea of Japan). Their co-existence is determined by the common structure of feeding behavior, which includes feeding on diatoms and, possibly, inorganic compounds. The mineral composition in diverticula was found to be the same for the two species of the genus *Scaphechinus* A. Agassiz, 1864. Our analysis showed the priority of zircon selection by *S. mirabilis* compared to *S. griseus*. The content of mineral oxides in bottom sediments at sampling sites was low. As revealed, the main organic food of the studied sea urchins from the bottom marine substrate is diatoms, represented by 17 species from the classes Coscinodiscophyceae (4 species), Fragilariophyceae (2), and Bacillariophyceae (11). Among them, solitary marine benthic forms, *Navicula dumontiae* Baardseth et Taasen, 1973 ($128 \cdot 10^3$ cells·cm⁻³), prevailed, as well as planktonic forms settling from the pelagic zone, *Asterionella formosa* Hassall, 1850 ($106 \cdot 10^3$ cells·cm⁻³). The high abundance of diatoms ($245 \cdot 10^3$ cells·cm⁻³) in coastal bottom sediments in sea urchin habitats may contribute to the successful development of these two endemic species of echinoids in the Sea of Japan. These findings are important for expanding our understanding of the trophic preferences of two related sea urchin species living beneath the surface of the sandy seabed.

Keywords: diatoms, minerals, zircon, ferrotitanium, diverticulum, sea urchin