

ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫЕ МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ ОБЪЕКТОВ
КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

УДК 552.086+902.699:902.01

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗОТОПНОЙ ГЕОХРОНОЛОГИИ ДЛЯ
ЛОКАЛИЗАЦИИ РЕГИОНОВ ИМПОРТА КАМЕННОГО МАТЕРИАЛА

© 2022 г. А. О. Хотылев^{1,*}, С. В. Ольховский², А. А. Майоров¹, О. В. Хотылев³, В. Б. Хубанов⁴

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт археологии РАН, Москва, Россия

³ АО “Зарубежгеология”, Москва, Россия

⁴ Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: akhotylev@gmail.com

Поступила в редакцию 21.03.2022 г.

После доработки 01.04.2022 г.

Принята к публикации 01.04.2022 г.

Представлены результаты изучения каменного материала, использованного для строительства портового причала древнегреческого города Фанагория. В результате комплексного анализа с использованием петрографических, геохимических, изотопных ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) и изотопно-геохронологических (U–Pb) методов установлено, что значительная часть изученного каменного материала происходит из Афинского залива. Это доказывает, что в IV–III в. до н.э. в Фанагорию осуществлялись поставки крупных объемов необработанного строительного камня, в частности, с побережья Эгейского моря.

DOI: 10.56304/S1992722322050090

ВВЕДЕНИЕ

Фанагория, основанная греками в VI в. до н.э. на южном берегу Таманского залива Черного моря, на протяжении многих веков являлась крупным транзитным центром на торговом пути из Средиземного моря в Азов (рис. 1). Город не располагал удобной естественной гаванью, но, несомненно, обладал развитой портовой инфраструктурой. В результате трансгрессии уровня Черного моря [1, 2] прибрежный район и порт Фанагории оказались затоплены и перекрыты донными отложениями.

К настоящему времени в акватории Фанагории известны два древних портовых сооружения. Одно из них является каменным причалом длиной 185 м, шириной 60–65 м, высотой 2–2.5 м, ориентированным перпендикулярно береговой линии. Ныне причал полностью перекрыт рыхлыми морскими осадками мощностью 0.2–0.7 м и практически не выражен в рельефе дна, локализовать его очертания удалось в результате систематической гидромагнитной съемки [3]. Для изучения конструкции этого сооружения были заложены девять шурфов, три из них прошли его насквозь до подошвы, а остальные шесть – пробили его кровельную часть на глубину до 1.5 м. Результаты шурфовки позволили верифицировать результаты гидромагнитного обследования и предоставили достоверные данные о размерах и

конструкции этого сооружения, а также о составе каменного материала, из которого он построен. Суммарный объем каменного материала, использованного для строительства причала, составляет не менее 30000 м³ и представлен вулканическими, плутоническими, осадочными и метаморфическими породами широкого спектра составов. На основе многочисленных археологических предметов, найденных в конструкции причала, период его строительства следует отнести к рубежу IV–III вв. до н.э. [3].

Второе портовое сооружение, исследованное в акватории Фанагории, построено в III–IV вв. н.э. на значительном удалении от первого и по иной технологии – из деревянных клетей, забутованных камнем [4].

В результате масштабных раскопок на Акрополе и Нижнем городе Фанагории установлено, что жители использовали каменный материал главным образом для строительства фундаментов, колодцев и локальной отстойки, а стены построек возводили из саманного кирпича [5]. Эта строительная технология нетипична для греческих полисов того времени и, вероятно, вынужденно применялась из-за отсутствия каменоломен вблизи Фанагории. Это же обстоятельство вынуждало горожан разбирать обветшавшие постройки для переиспользования их каменного материала.

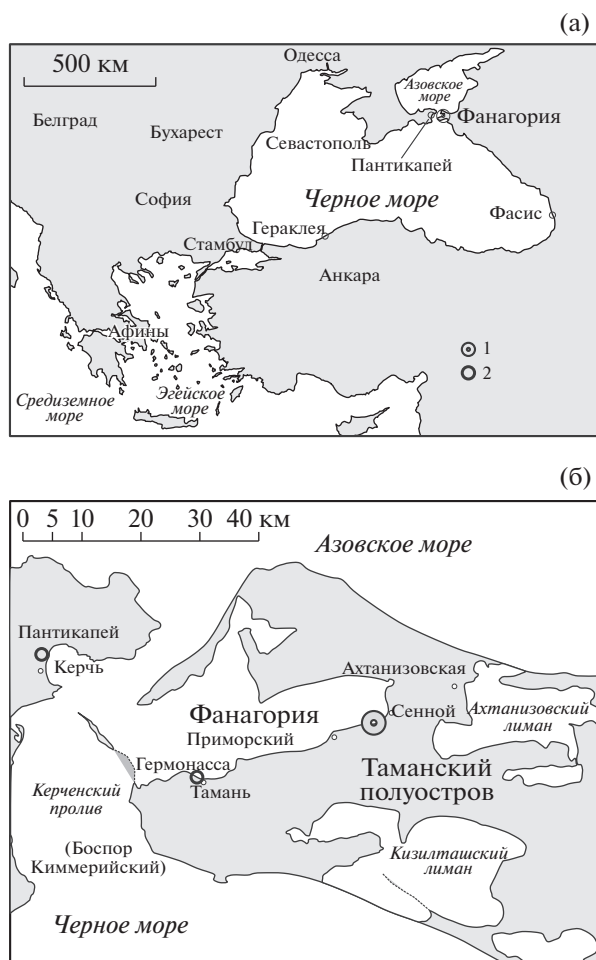


Рис. 1. Карты Средиземноморского региона (а) и района Боспора Киммерийского (б) с наиболее значимыми древнегреческими полисами.

Развитие Фанагории в качестве центра морской транзитной торговли несомненно требовало строительства масштабной портовой инфраструктуры, особенно в условиях отсутствия удобной естественной гавани. Исходя из оценок объема каменного материала, использованного для строительства фанагорийского причала, есть все основания утверждать, что в город на протяжении длительного времени регулярно поступали крупные партии строительного камня. Так как прибрежные города Средиземноморья и южного побережья Черного моря, как правило, не испытывали дефицита местного строительного материала, каменная торговля внутри этого региона вряд ли имела экономический смысл и значительный масштаб. В то же время Фанагория поддерживала торговые отношения с целым рядом городов Средиземноморья и южного побережья Черного моря, потому представляется вероятным, что наряду с обычным товарным ассортиментом могла закупать в отдаленных регионах

крупные объемы необходимого каменного материала.

Для доказательства этой гипотезы нужно установить источники происхождения каменного материала, обнаруженного в конструкции причала и фундаментах построек Акрополя Фанагории. Логично предполагать, что каменный материал поступал в Фанагорию из тех же городов, что и прочий импорт, однако, учитывая длительные торговые связи Боспора с городами Черного, Эгейского и Мраморного морей, это позволит лишь несколько сузить возможный список регионов, но не локализовать их достаточно обоснованно. Для убедительной идентификации регионов происхождения каменного материала можно применить широкий спектр аналитических методов.

МЕТОДЫ

К настоящему времени имеется обширный опыт изучения мраморных изделий разнообразными методами — начиная с оценки размеров и формы кристаллов [6], рентгенофазового анализа [7], и заканчивая высокоточными методами — электронный парамагнитный резонанс, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), нейтронно-активационный анализ, анализ по изотопам углерода, кислорода и стронция [6, 8]. Относительно небольшое количество месторождений, поставлявших скульпторам и архитекторам высококачественный мрамор, позволяет достоверно локализовать источник происхождения каждого конкретного изделия.

С другой стороны, известны исторические данные о строительстве специальных крупнотоннажных судов грузоподъемностью 150–200 тонн для перевозки колонн и каменных блоков [9, 10]. Однако результаты подобных исследований затруднительно применить к обычному строительному камню, так как доля мраморов в выборке из Фанагории крайне невелика, а обломки обработанных изделий вообще не обнаружены.

Более подходящими для решения поставленной задачи представляются методы идентификации района происхождения горных пород на основе анализа их петрографического (минерального) состава, а также по комплексам микрофауны. Первый метод был успешно использован для анализа балластных камней из римского порта *Caesarea Maritima* (Израиль), что позволило выделить в балластном камне привозные породы среди местных [11]. В результате анализа нанопланктона из балластного камня судна *Akko Tower wreck* (Израиль) породы датированы верхним мелом, но точно локализовать район их происхождения не удалось из-за широкого распространения меловых осадочных комплексов в Средиземноморье [12]. При изучении балластных кам-

ней из порта на реке Кейп-Фир (Северная Каролина, США) в результате анализа видового состава фораминифер обоснована гипотеза об их происхождении из миоцен-олигоценых комплексов Карибских островов [13]. Достаточно успешно и исследования известняков сооружений Нового Иерусалима для реставрационных работ на основе изучения нескольких групп фаунистических остатков [14].

Практически все перечисленные выше методы анализа применимы только к породам, содержащим фаунистические остатки (осадочные горные породы), и мраморам, но непригодны для магматических (вулканических, плутонических) пород. Исключение составляет только петрографический анализ, использованный в настоящей работе.

Значительную долю каменного материала, найденного в конструкции причала и в кладках фундаментов Акрополя Фанагории, составляют вулканические породы, которые являются основным предметом данного исследования.

Для определения региона их происхождения использовали ряд методов, в том числе оценку размеров каменного материала, петрографический анализ, геохимические исследования, анализ нескольких изотопных систем. Полученные результаты были сопоставлены с опубликованными данными составов, возрастов и изотопных отношений вулканических пород Средиземноморского и Черноморского регионов.

Оценка размеров и качественного состава каменного материала причала проведена на двух выборках объемом 248 и 400 образцов из двух шурфов с отбором по всей мощности сооружения.

Для геохимической характеристики пород определены содержания петрогенных оксидов и рассеянных элементов (табл. 1). Анализ петрогенных оксидов (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O) и некоторых малых элементов (Rb, Sr, Ba, Pb, Th, Zr, Nb) выполнен А.И. Якушевым в ИГЕМ РАН (г. Москва) методом рентгено-спектрального флуоресцентного анализа на вакуумном спектрометре последовательного действия с дисперсией по длине волны PANalytical Axiosm AX, по методике НСАМ ВИМС 439-РС. Потери при прокаливании определены по методике НСАМ ВИМС 118-Х, нижние пределы обнаруженный составляют 0.1–0.05 мас. %.

Анализ рассеянных (Cs, Rb, Ba, Th, U, Ta, Nb, Sr, Pb, Zr, Hf, Y) и редкоземельных элементов (РЗЭ) выполнен Я.В. Бычковой в лаборатории кафедры геохимии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова методом ИСП-МС на масс-спектрометре высокого разрешения с двойной фокусировкой Element-2 с разложением по стандартным методикам спекания [15, 16].

Изотопный возраст пород определен по цирконам из одной пробы андезитов. Цирконы из-

влечены в лаборатории Геологического института РАН (г. Москва) по стандартным методикам с использованием тяжелых жидкостей из пробы весом 3 кг. Датирование 38 зерен циркона выполнено в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) по U–Pb изотопной системе методом лазерной абляции с индукционно-связанной плазмой и масс-спектрометрическим окончанием с применением одноколлекторного магнитно-секторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Element XR и установки для лазерной абляции NWR 213, аналитик В.Б. Хубанов. Детальное описание методики приведено в [17]. Размер кратера составил 25–40 мк. Фракционирование элементов и их изотопов калибровали по международным стандартам GJ, 91500 и Plesovice. Обработку данных масс-спектрометрического анализа выполняли в программе GLITTER [18]. Для расчета U–Pb взвешенных средних возрастов и построения диаграмм применяли макрос Isoplot4.15 [19]. Величины изотопных отношений и возрастов индивидуальных зерен приведены с погрешностью 1б. Возраст рассчитывали по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

Изотопный состав Sr и Nd определен аналитиком А.В. Чугаевым в ИГЕМ РАН (г. Москва) с использованием традиционных методик химической подготовки проб к масс-спектрометрическому анализу. Определение содержаний Rb, Sr, Sm и Nd в образцах и изотопных отношений $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ проведено методом изотопного разбавления с помощью смешанных ^{85}Rb – ^{84}Sr - и ^{149}Sm – ^{150}Nd -трассеров, добавленных в образцы непосредственно перед химическим разложением. Навески проб пород (~0.05 г) разлагались в смеси концентрированных кислот $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ при атмосферном давлении в течение 24 ч при температуре ~120°C.

Химическую подготовку препаратов Rb, Sr, Sm и Nd для последующего масс-спектрометрического анализа проводили с применением двустадийной ионообменной хроматографии. На первой стадии от элементов матрицы образца отделяли фракции Rb, Sr и легких РЗЭ. Выделение фракций проводили в 2.4 М HCl на ионообменных колонках, заполненных 3 мл катионита BioRad W50x8. Хроматографическое отделение Nd и Sm от других легких РЗЭ осуществляли на второй стадии с использованием колонок, заполненных 0.5 мл HDEHP, нанесенной на гранулы Kel-F. Уровень фона при указанной схеме химической подготовки составлял 0.1 нг для Sr и менее 0.1 нг для Nd.

Анализ изотопного состава Rb, Sr, Sm и Nd в выделенных фракциях выполнен на многоколлекторном термоионизационном масс-спектрометре Micromass Sector 54. Правильность масс-спектрометрических измерений изотопных

Таблица 1. Химический состав вулканических пород причала Фанагории

	Номер образца									
	2121	2121-2	1	028	081	2183	219	2226	2227	511
SiO ₂	61.59	59.92	55.53	59.71	64.74	63.43	60.11	63.88	57.58	57.23
TiO ₂	0.46	0.53	0.91	0.52	0.57	0.59	0.61	0.48	0.69	0.57
Al ₂ O ₃	16.87	16.46	16.16	15.35	15.99	16.54	17.59	17.18	15.32	16.79
Fe ₂ O ₃	5.17	5.60	7.94	6.23	4.66	5.00	4.76	3.63	5.94	4.51
TFeO	4.65	5.04	7.15	5.61	4.19	4.50	4.28	3.27	5.35	4.06
MnO	0.12	0.11	0.14	0.13	0.14	0.03	0.08	0.08	0.12	0.13
CaO	6.35	6.82	8.00	4.91	5.51	4.54	5.21	4.57	5.75	5.91
MgO	2.71	3.05	4.49	2.85	0.58	0.78	0.93	1.33	3.41	1.05
Na ₂ O	3.58	3.61	3.47	2.78	3.35	3.91	4.42	4.68	4.36	3.56
K ₂ O	2.32	2.44	1.95	2.13	1.69	2.07	2.04	2.48	1.99	2.50
P ₂ O ₅	0.13	0.17	0.17	0.11	0.17	0.16	0.16	0.14	0.17	0.16
ППП	0.38	0.86	0.83	5.03	2.41	2.77	3.89	1.02	4.04	6.34
Rb	77.8	77.0	54.5	52.7	50.6			72.0	41.0	47.1
Sr	389.6	396.0	339.4	229.4	313.8			507.0	1247.0	223.9
Y	16.8	19.0	26.9	20.3	25.2			12.0	17.0	25.0
Cs	1.1		0.8	0.5	0.8			1.4		0.4
Ba	602.1	627.0	331.4	335.7	344.5			614.0	1005.0	313.4
La	20.6		20.3	12.3	16.7			17.4		14.9
Ce	35.3		41.5	26.4	37.0			32.0		32.4
Pr	3.9		4.8	3.3	4.6			3.5		4.0
Nd	14.3		18.3	13.5	19.5			13.8		16.3
Sm	2.8		4.4	3.6	4.9			2.7		4.2
Eu	0.9		1.2	0.9	1.3			0.8		1.2
Gd	3.2		3.8	2.9	3.9			2.9		3.7
Tb	0.5		0.7	0.5	0.7			0.4		0.7
Dy	2.7		4.6	3.6	4.6			2.2		4.4
Ho	0.6		1.0	0.8	1.0			0.4		0.9
Er	1.7		2.8	2.4	3.0			1.4		2.6
Tm	0.2		0.4	0.4	0.5			0.2		0.4
Yb	1.7		2.8	2.4	2.9			1.4		2.6
Lu	0.3		0.4	0.4	0.4			0.2		0.4
Pb	17.3	19.0	23.7	6.5	6.5			14.7	12.0	7.2
Th	13.5	7.0	10.0	3.8	3.1			7.1	<5	2.9
U	2.2		3.0	1.0	0.9			1.6	<5	0.9
Zr	82.3	117.0	185.1	89.1	97.2			86.0	85.0	93.8
Nb	7.6	9.0	5.6	3.7	5.3			9.4	13.0	2.3
Hf	2.1		4.5	2.1	2.3			2.1		2.2
Ta	0.0		0.5							

Таблица 1. Окончание

	Номер образца									
	514	543	600	601	633	641	691	695	120	
SiO ₂	56.72	60.04	63.93	61.82	59.53	60.73	64.04	61.24	57.85	
TiO ₂	0.59	0.64	0.75	0.87	0.77	0.66	0.70	0.91	0.70	
Al ₂ O ₃	16.10	17.15	16.43	16.77	16.52	15.78	16.20	17.45	18.78	
Fe ₂ O ₃	6.14	5.39	3.99	4.74	4.71	5.29	4.05	3.82	4.96	
TFeO	5.53	4.85	3.59	4.27	4.24	4.76	3.65	3.44	4.46	
MnO	0.11	0.06	0.04	0.04	0.20	0.10	0.05	0.03	0.07	
CaO	4.86	4.96	4.74	5.02	8.78	5.70	4.92	5.26	8.55	
MgO	2.39	1.06	0.90	1.26	2.65	1.74	1.78	0.92	1.63	
Na ₂ O	3.89	4.05	4.34	4.25	3.37	3.53	4.17	4.25	2.93	
K ₂ O	1.98	2.02	2.76	2.82	2.53	3.23	2.50	2.82	2.66	
P ₂ O ₅	0.16	0.16	0.23	0.34	0.15	0.29	0.30	0.35	0.20	
ППП	5.58	3.16	1.12	1.07	0.37	1.95	1.02	1.81	1.18	
Rb	36.4	39.3	67.0	65.0	66.0	116.0	66.0	71.0	84.3	
Sr	206.1	290.6	448.0	509.0	301.0	708.0	594.0	575.0	465.4	
Y	23.7	23.4	13.0	16.0	19.0	20.0	11.0	18.0	16.4	
Cs	0.3	0.2							2.3	
Ba	290.2	307.4	551.0	809.0	533.0	1665.0	537.0	582.0	461.3	
La	13.9	14.1							22.8	
Ce	30.3	29.8							44.7	
Pr	3.8	3.9							5.1	
Nd	15.6	15.5							19.0	
Sm	4.1	4.0							4.3	
Eu	1.1	1.2							1.3	
Gd	3.6	3.6							3.4	
Tb	0.6	0.6							0.5	
Dy	4.1	4.1							3.1	
Ho	0.8	0.8							0.6	
Er	2.4	2.5							1.7	
Tm	0.3	0.4							0.2	
Yb	2.5	2.5							1.5	
Lu	0.4	0.4							0.2	
Pb	7.4	8.1	16.0	23.0	10.0	39.0	16.0	13.0	16.8	
Th	2.6	2.8		10.0		20.0	9.0	7.0	8.2	
U	0.8	1.2							2.7	
Zr	94.6	101.6	163.0	165.0	102.0	168.0	149.0	162.0	110.6	
Nb	2.4	2.9	19.0	19.0	6.0	16.0	18.0	20.0	3.2	
Hf	2.6	2.7							2.5	
Ta		0.1							0.1	

Примечание. Содержания петрогенных оксидов в мас. %, содержания рассеянных и редкоземельных элементов в мгк/кг.

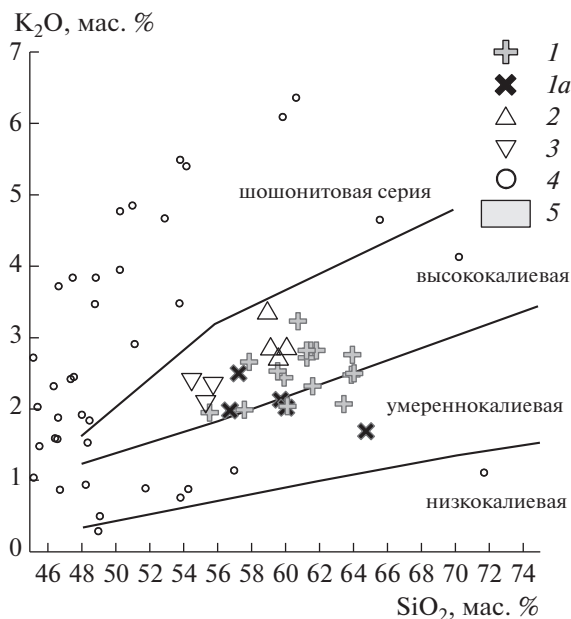


Рис. 3. Диаграммы SiO₂–K₂O для пород из причала Фанагории: 1 – андезиты, обедненная группа, 1a – андезиты, обогащенная группа, 2 – трахиандезиты, 3 – трахи-андезитобазальты, 4 – прочие разности, 5 – вулканы острова Эгина [20].

источника на диаграммах обычно формируют единые облака фигуративных точек [22]. Группа базанитов–тефритов по этому признаку оказалась изолирована от точек пород нормальной щелочности, и с высокой вероятностью происходит из каких-то иных вулканических комплексов или

комплексов другого возраста, поэтому в данном исследовании ее исключили из рассмотрения (рис. 2, 3).

По содержаниям основных петрогенных оксидов выбранная группа пород нормальной щелочности неоднородна. На диаграмме TAS ее фигуративные точки образуют три скопления: большое поле андезитов из 21 пробы, включающее в себя две фигуративные точки пробы 2121 (выполняли анализ разных фрагментов одного большого валуна, на диаграммах точки пробы 2121 указаны стрелками), а также поля трахиандезитов (четыре пробы) и трахи-андезитобазальтов (три пробы). Три выборки на диаграмме K₂O–SiO₂ лежат единым облаком, но так как выборки 2 и 3 отличаются повышенными по сравнению с выборкой 1 содержаниями Na₂O, их исключили из дальнейшего рассмотрения, так как они, вероятно, относятся к иным вулканическим сериям.

В результате в рассмотрение включили группу из 21 пробы, для всех из них определены содержания петрогенных оксидов, для 19 из них – содержания малых элементов, для 10 из них – содержания рассеянных и редкоземельных элементов. Все образцы группы обладают сходными содержаниями петрогенных оксидов и достаточно близки между собой по составу.

Все пробы этой группы характеризуются сходными содержаниями рассеянных элементов: обогащены свинцом, рубидием, барием, торием и ураном, обеднены ниобием и танталом. По степени обеднения тяжелыми РЗЭ пробы подразделяются на две подгруппы (рис. 4): пробы 2121, 120, 2226, обедненные тяжелыми РЗЭ и обогащенные

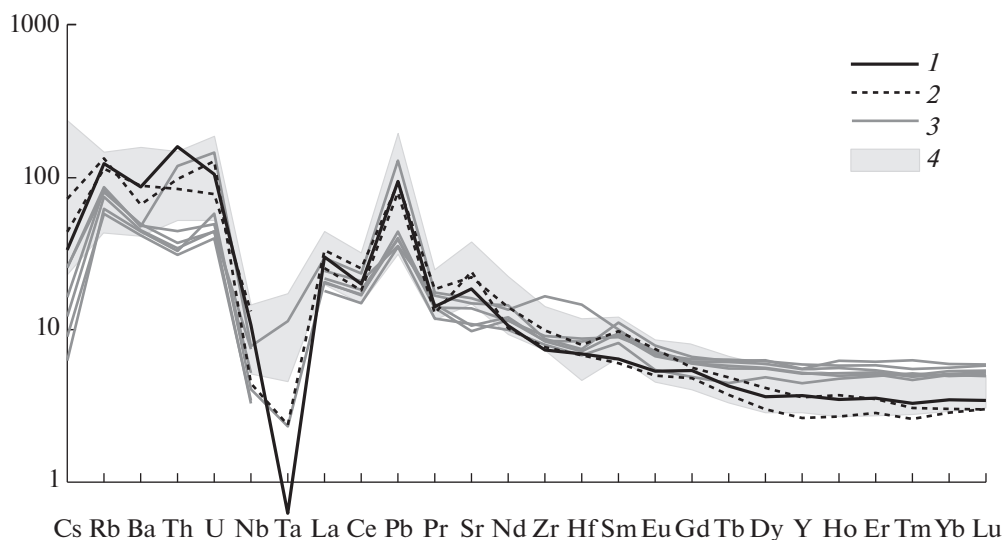


Рис. 4. Мультиэлементная диаграмма для андезитов из причала. Содержания нормированы на хондрит (CI) по [23]. В выборке на диаграмме 10 проб, для которых получены данные по содержаниям рассеянных и редкоземельных элементов: 1 – андезиты пробы 2121, 2 – андезиты обедненной группы, 3 – андезиты обогащенной группы, 4 – поле породы Эгины по данным [20].

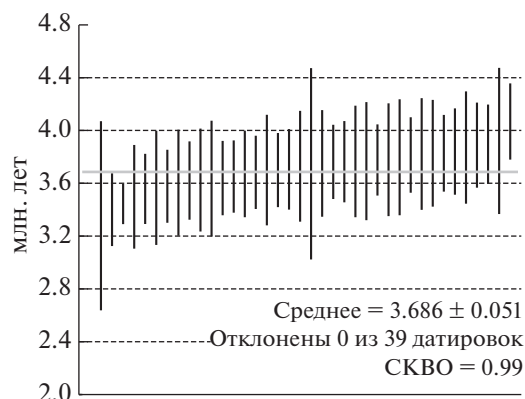


Рис. 5. Взвешенный средний возраст андезитов пробы 2121. Для расчета использованы замеры 39 зерен цирконов, среднее квадратичное отклонение (СКВО) 0.99.



Рис. 6. Схема расположения основных вулканических центров Южно-Эгейской островной дуги.

торием, ураном, свинцом, рубидием и барием, и все остальные пробы (028, 1, 081, 511, 543, 514, 2513), которые обогащены тяжелыми редкоземельными и обеднены прочими элементами.

Указанное выше деление на две подгруппы будет заметно и на остальных диаграммах. Обогащенная группа из шести проб (028, 1, 081, 511, 543, 514) на бинарных диаграммах будет показана отдельным знаком и индексом “1a”, а обедненная — индексом “1”. Проба 2513 занимает обособленное от остальных проб обогащенной группы положение, поэтому в нее не включена.

Определение изотопного возраста выполнено для одной пробы андезитов (2121). Породы светло-серые, розоватые, иногда коричневатые, густо-порфиоровые, массивные, местами неотчетливо-флюидальные. Вкрапленники представлены коротко-призматическим белым сахаровидным плагиоклазом с тонкой зональностью, размером 3–4 мм (до 17–20%), удлиненно-призматическими кристаллами черной и красновато-бурой роговой обманки размером от 1 до 5–6 мм (5–10%, варьирует). Отмечаются немногочисленные округлые кристаллы кварца до 2 мм (1–3%).

Выполнено датирование 39 зерен хорошо оформленных красновато-коричневых цирконов, по которым получен средний возраст 3.686 ± 0.051 млн. лет, соответствующий среднему плиоцену (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ

Для локализации района происхождения вулканических пород, найденных в Фанагории, в работе обобщены опубликованные данные о возрасте вулканических пород Черноморско-Эгейского региона.

Критерием отбора районов развития искомым вулканических пород является их расположение на морских побережьях, так как весь изучаемый

каменный материал из конструкции фанагорийского причала окатан. Вторым критерием является возраст вулканических образований: рассматривали только плиоценовые вулканы возрастом 5.3–2.5 млн. лет, так как установленный нами возраст андезитов составляет 3.6 млн. лет. Поэтому исключили из рассмотрения ареалы неоген-четвертичного внутриконтинентального вулканизма в Турции и Армении, расположенные на значительном удалении от морских побережий [24]. Вулканы восточного побережья Эгейского моря, хотя и расположены на побережье, имеют значительно более древний возраст — 15–20 млн. лет [25, 26], поэтому тоже не рассматривались.

Вулканические образования Эльбруса и Казбека (Центральный Кавказ) [27, 28] не включены в анализируемую выборку, так как этот регион дренируется реками бассейна Терека и Баксана, впадающими в Каспийское море, и местный каменный материал не мог использоваться для строительства сооружений в дельте Кубани.

Таким образом, ближайшим к Фанагории регионом, где на морских побережьях расположены вулканические комплексы искомого возраста, является бассейн Эгейского моря. Вулканические комплексы плиоценового возраста (5–2.5 млн. лет) наиболее широко развиты в центральной части Эгейского моря в пределах Южно-Эгейской островной дуги [29]. Дуга включает в себя вулканы северного побережья — Эгина, Метана, Милос, часть архипелага Киклады (острова Милос, Санторини) и Южные Спорады (Нисирос, Яли, Кос). Многие из этих вулканических центров активны до настоящего времени — извержения вулканов Метана, Милос, Нисирос, Колумбо, Санторини происходили относительно недавно (рис. 6).

Вулканическая активность в пределах Южно-Эгейской островной дуги началась около 5 млн. лет назад и развивалась неравномерно [29]. Древ-

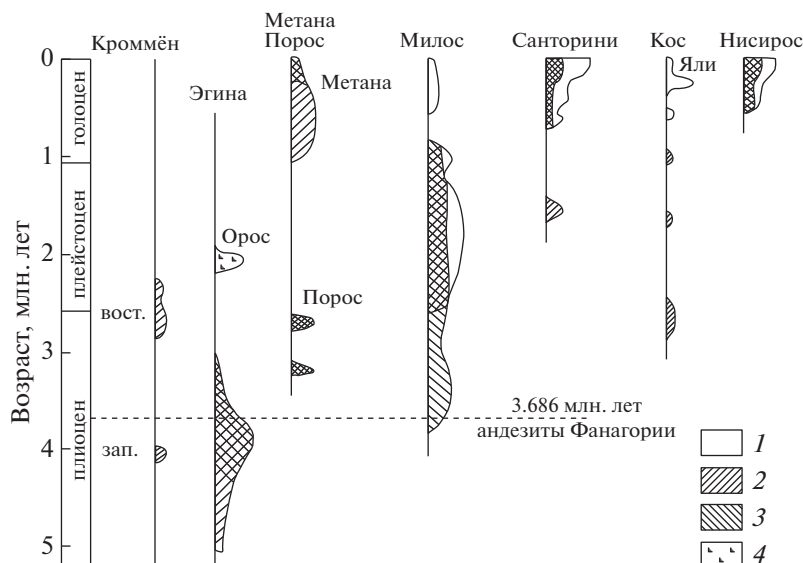


Рис. 7. Схема эволюции вулканической активности Южно-Эгейской островной дуги, согласно [29]. Ширина поля соответствует интенсивности развития вулканизма: 1 – риолиты, 2 – дациты, 3 – андезиты, 4 – базальты.

нейшие вулканические комплексы расположены на западе дуги, а в центральной и восточной ее частях вулканизм имеет более молодой возраст. В интересующий временной интервал (3–4 млн. лет) вулканическая активность отмечена на острове Эгина (Aegina, Egina), на острове Милос и в местечке Кроммён (Crommyonia, Crommyon) – все эти локации расположены в акватории или на побережье Саронического (Афинского, Сароникос) залива (рис. 6, 7).

Все изучаемые пробы найденных в Фанагории андезитов обеднены танталом и ниобием, обогащены крупно-ионными элементами – свинцом, барием, рубидием, торием и ураном (рис. 4). Такое соотношение типично для пород, сформировавшихся в условиях островных дуг [22], и соответствует условиям Южно-Эгейской островной дуги. Для определения района происхождения изучаемых андезитов следует сравнить их с одно-возрастными комплексами Эгины, Милоса и Кроммёна.

Важно отметить, что в пределах Южно-Эгейской островной дуги отсутствуют вулканические породы щелочного ряда (базаниты–фонотефриты), широко представленные в каменном материале Фанагории (рис. 2). Это указывает на параллельное поступление в Фанагорию вулканического материала из нескольких регионов, причем расположенных вне упомянутой выше островной дуги.

Для сравнения использовали 53 пробы разновозрастных вулканических комплексов Эгины [20], также более 1500 значений из базы данных Геогоск [21], содержащей результаты анализов

пород многих комплексов Южно-Эгейской островной дуги.

Породы из Кроммёна отличаются повышенной кремнекислотностью и низкими содержаниями TiO_2 , породы острова Милос по геохимическим характеристикам близки вулканитам Эгины и прочих центров Южно-Эгейской островной дуги (рис. 8). Значимые различия выявлены только в содержаниях РЗЭ: породы Милоса обладают отрицательной аномалией европия. Лучшее всего эта разница заметна в значениях отношений Eu/Gd , Lu/Gd и Sm/Eu – фигуративные точки проб Милоса и Эгины образуют два изолированных облака, а точки проб из изучаемого причала располагаются в облаке точек Эгины (рис. 8). Считаем возможным использовать эти соотношения для сравнения проб, так как РЗЭ, как и титан, устойчивы к вторичным преобразованиям, и их содержания не изменяются во вторичных процессах. Таким образом, по своим геохимическим характеристикам все андезиты аналогичны андезитам Эгины и значительно отличаются от вулканических пород Милоса и Кроммёна.

Андезиты из Эгины, описанные в [20], идентичны андезитам из Фанагории не только по геохимическим характеристикам, но и по облику, структуре, размерам кристаллов и минеральному составу. Это важно, так как близкие по геохимическим характеристикам породы могут формироваться в разных условиях, например лава и пепел одного состава могут быть абсолютно одинаковыми по геохимии, но принципиально разными по структуре. Структурно-текстурные особенности и геохимические параметры позволяют сле-

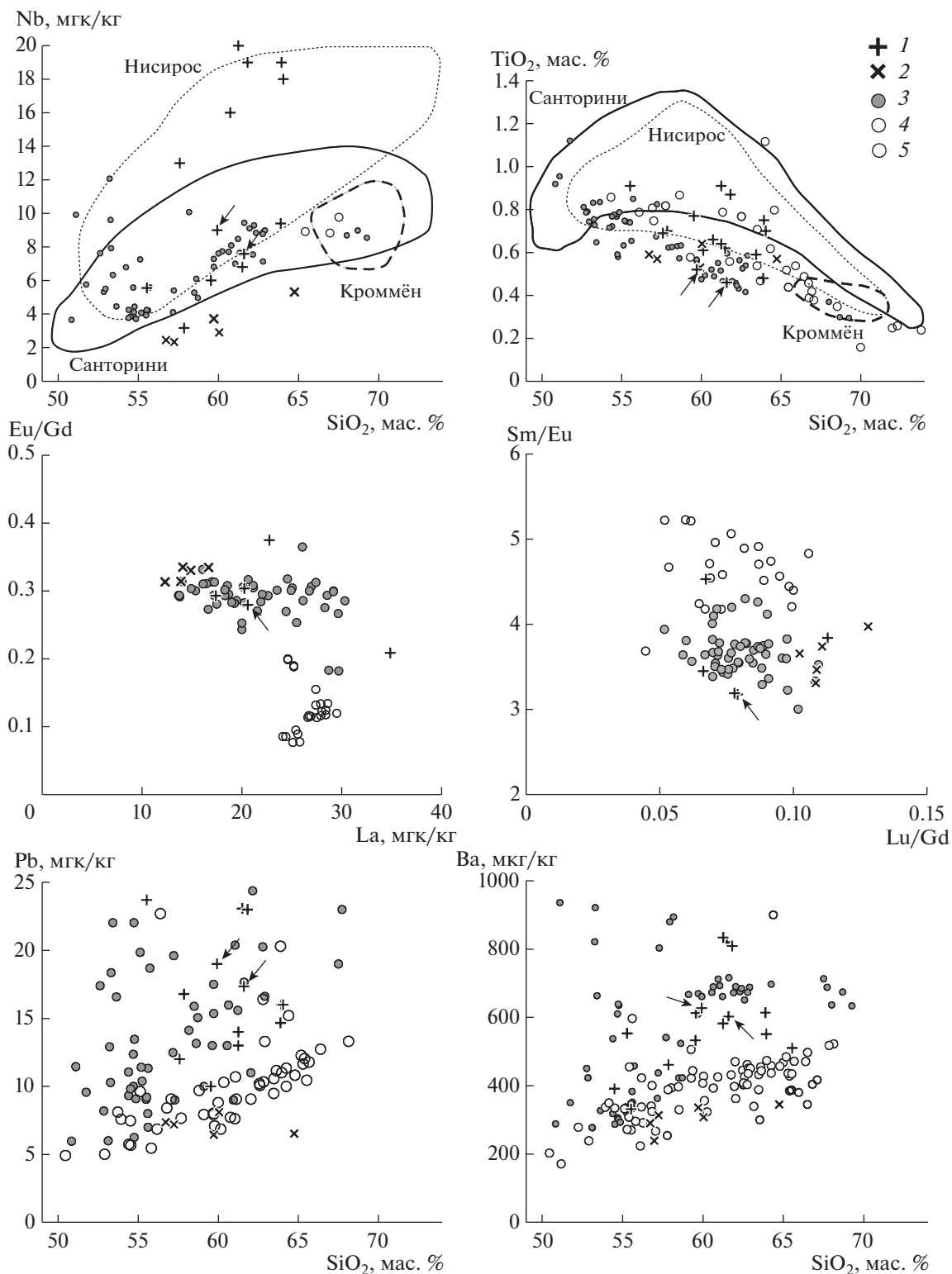


Рис. 8. Бинарные диаграммы для проб из причала Фанагории и островов Южно-Эгейской островной дуги. Значения для островов Эгина, Метана, Милос, Санторини, Кроммён и Нисирос приведены по данным [20, 21, 30]. Содержания рассеянных элементов в мгк/кг, оксидов – в мас. %; 1 – обедненные андезиты Фанагории, 2 – обогащенные андезиты Фанагории, 3 – вулканиты Эгины, 4 – вулканиты Милоса, 5 – вулканиты Метаны.

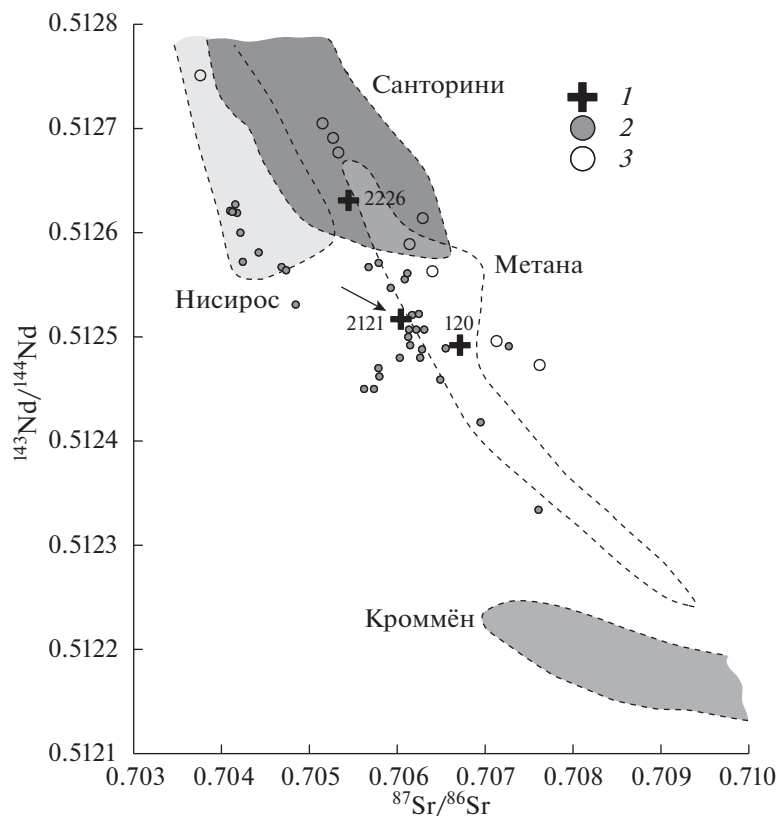


Рис. 9. Диаграмма $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ для плиоценовых вулканитов Южно-Эгейской островной дуги и пород из причала Фанагории. Поля пород Санторини, Нисироса, Эгины, Милоса и Кроммёна приведены по данным [21, 21, 30]; 1 – андезиты Фанагории, 2 – вулканиты Эгины, 3 – вулканиты Милоса.

лать вывод, что изучаемые андезиты из Фанагории происходят именно с Эгины.

В качестве еще одного параметра для сравнения использовали изотопные отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – еще более устойчивые во вторичных процессах по сравнению с содержаниями отдельных элементов. Отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ сохраняется неизменным даже при некоторых степенях метаморфизма. Содержание изотопов стронция менее стабильно и может изменяться в ходе вторичной карбонатной минерализации. Отсутствие в изучаемых породах вторичных минералов, в первую очередь карбонатов, позволяет утверждать, что отношения не изменялись, и можем использовать их как достоверный параметр для сравнения даже при малом количестве точек.

На диаграмме заметно, что поле пород Кроммёна отличается низкими значениями отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и более высокими значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ по сравнению с пробами Эгины и Милоса, и в это поле не попадают пробы из изучаемого причала (рис. 9). Заметные различия в химическом составе и изотопных отношениях позволяют утверждать, что в изученной выборке андези-

тов Фанагории отсутствует материал, происходящий из Кроммёна.

Фигуративные точки проб 2121 и 120 расположены одновременно в полях проб районов Эгина и Метана (рис. 9). Если для пробы 2121, возраст которой известен, происхождение с Эгины не вызывает сомнений, то проба 120 оказывается одновременно в полях пород Эгины и Метаны. Территориально эти районы расположены очень близко, и их вулканические породы весьма сходны по всем параметрам. Выявлено лишь одно различие: вулканиты Эгины по сравнению с породами полуострова Метана обогащены свинцом. Фигуративные точки пробы 120 расположены в поле пород Эгины (рис. 8), что позволяет идентифицировать пробу с этой локацией. Так как все три пробы, для которых установлены содержания изотопов стронция и неодима, близки собой по всем геохимическим параметрам (рис. 4, 9), полагаем, что все они происходят из одного вулканического комплекса. Проба 2226 не попадает в поле точек Эгины на диаграмме Sr–Nd (рис. 9), но лежит на продолжении их тренда, что позволяет предполагать, что и она происходит с острова Эгина.

Определение источника проб обогащенной группы Ia оказалось более сложным. Фигуративные точки этих проб на всех диаграммах расположены плотной группой, что указывает на их происхождение из одного источника. Они явно отличаются от пород острова Милос на диаграмме La—Eu/Gd, Sm/Eu—Lu/Gd и от пород Кроммёна по кремнекислотности, т.е. происходят не из этих районов. По характеру распределения РЗЭ они близки к породам острова Метана и похожи на породы Эгины. Вулканиды островов Эгина и Метана различаются только содержанием бария [20, 30] (рис. 8). Пробы обогащенной группы характеризуются высокими содержаниями бария, близкими к породам Эгины, поэтому полагаем, что они также происходят с Эгины.

Указать источник происхождения проб, не охарактеризованных содержаниями РЗЭ и изотопных отношений, пока затруднительно. В целом они близки породам Эгины, но могут происходить и из иных вулканических центров Южно-Эгейской островной дуги.

Убедительная идентификация района происхождения изучаемых вулканидов позволяет утверждать, что в IV—III в. до н.э. из Афинского залива в Фанагорию поступали крупные объемы необработанного строительного камня. Так как состав и облик вулканических пород, найденных в изучаемом причале и в фундаментах фанагорийского Акрополя, очень близки между собой, они с высокой вероятностью происходят из одних и тех же районов. В частности, в фундаментах Акрополя обнаружены [31] андезиты, аналогичные описанным в настоящей работе, которые также происходят с Эгины.

Являются ли масштабные поставки строительного камня из удаленных регионов в Фанагорию уникальным случаем или камень привозили и в соседние города? Постройки Пантикапея (совр. Керчь, 40 км к северо-западу от Фанагории) выполнены из известняка, происходящего из многочисленных близлежащих каменоломен, поэтому сколь-нибудь массовый импорт строительного камня в столицу Боспорского царства представляется нецелесообразным. Рекогносцировочный анализ каменного материала построек античной Гермонассы (ст. Тамань, 20 км к западу от Фанагории) показал полное преобладание местных органогенных известняков, происходящих, вероятно, из прибрежных рифовых гряд, доступных для добычи камня в период Фанагорийской регрессии уровня Черного моря [1, 2, 31]. Тем не менее среди осмотренных 1000 камней выявлены 10 валунов крупнопорфировых базальтов, трахиандеибазальтов, диоритовых и гнейсов, аналогичных найденным в конструкции причала и в кладках Акрополя Фанагории. Вероятно, эти камни поступили в Гермонассу из тех же регионов, но объ-

ем этих поставок по сравнению с Фанагорией несопоставимо мал. Данные о составе каменного материала, использованного для строительства иных полисов Северного Причерноморья, не выявлены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение комплексной методики анализа вулканических пород, включающей в себя петрографию, геохимию и изотопные отношения, позволило точно идентифицировать один из районов происхождения каменного материала, использованного для строительства портовых сооружений Фанагории. Результаты геохимических и изотопно-геохронологических исследований свидетельствуют, что изучаемые андезиты привезли в Фанагорию с острова Эгина в Афинском заливе.

Отметим, что провести идентификацию удалось только благодаря комплексному характеру исследования, так как геохимическая характеристика пород, содержание изотопов стронция и неодима, изотопный возраст пород, выполненные сами по себе, не позволили бы прийти к однозначному выводу из-за наличия в регионе множества вулканических комплексов близкого возраста со сходными геохимическими характеристиками.

Вулканические породы субщелочной и щелочной серии (базаниты—фонотефриты), также массово присутствующие в конструкции фанагорийского причала, отсутствуют в пределах Южно-Эгейской островной дуги, следовательно, их привезли в Фанагорию из иных районов, которые еще предстоит установить.

Авторы выражают благодарность начальнику Фанагорийской экспедиции ИА РАН В.Д. Кузнецову за возможность работы с материалом, Д. Пеппер (Georgia Pe-Pier, Saint Mary's University, Halifax, Canada) за консультации, Б.Б. Шкурскому и П.Л. Тихомирову (МГУ им. М.В. Ломоносова) за помощь в анализе геохимических и изотопных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fouache E., Kelterbaum D., Brückner H. et al. // *Quaternary International*. 2012. V. 266. P. 162. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.04.008>
2. Дикарев В.А. // *Вестн. МГУ. Сер. 5. География*. 2011. № 1. С. 35.
3. Khotylev A., Olkhovskiy S. // *Skyllis*. 2020. V. 20. P. 97.
4. Румянцева О.С., Ольховский С.В. // *Российская археология*. 2015. № 2. С. 86.
5. Завойкин А.А., Кузнецов В.Д. // *Проблемы истории, филологии, культуры*. 2011. № 4 (34). С. 188.
6. Keyren F.V., Attanasio D., Herrmann J.J. et al. // *Life, death and representation: some new work on Roman sarcophagi* / Ed. Jaś Elsner, Janet Huskinson. Berlin:

- De Gruyter 2011. P. 149.
<https://doi.org/10.1515/9783110216783.149>
7. *Calliogo Th., Coquinot Y., Guerra M.F. et al.* // Open J. Archaeometry. 2013. V. 1:e14. P. 68.
<https://doi.org/10.4081/arc.2013.e14>
 8. *Brilli M., Giustini F., Conte A.* // J. Archaeol. Sci. Rep. 2015. V. 4. P. 124.
 9. *Hocker F.* // Lead Hull Sheathing in Antiquity. 3rd International Symposium on Ship Construction in Antiquity, 1989. Athens 1995. P. 197.
 10. *Littlefield J.D.* The Hull Remains of the Late Hellenistic Shipwreck at Kizilburun, Turkeya. University of Texas, 2012. 140 p.
 11. *Boyce J.I., Reinhardt E.G., Goodman B.N.* // J. Archaeol. Sci. 2009. V. 36. P. 1516.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.03.007>
 12. *Bar A., Olivarius M., Boldreel L.-O. et al.* // J. Archaeol. Sci. Rep. 2019. V. 26.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.101911>
 13. *Burdette K.M.W., Smith M.S.* // Southeastern Geology. 2014. V. 50. P. 93.
 14. *Алексеев А.С., Леушина И.В., Панасьян Л.Л.* // Вестн. Российской академии естественных наук. 2016. № 1. С. 3.
 15. *Бычкова Я.В., Николаева И.Ю., Ермина О.С. и др.* // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2018. № 5. С. 53.
 16. *Бычкова Я.В., Сеницын М.Ю., Петренко Д.Б. и др.* // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2016. № 6. С. 56.
 17. *Зайцева М.В., Пупышев А.А., Шапова Ю.В., Вотяков С.Л.* // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. № 4. С. 294.
 18. *Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y.* // Mineral. Assoc. Canada. Short Course. 2008. V. 40. P. 308.
 19. *Ludwig K.R.* // Berkeley Geochron. Center Spec. Publ. 2008. V. 4. P. 76.
 20. *Elburg M.A., Smet I.* // Lithos. 2020. V. 358–359.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105416>
 21. Georock database: georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/
 22. *Склярёв Е.В., Гладкоцуб Д.П., Донская Т.В. и др.* Интерпретация геохимических данных: Учеб. пособие / Под ред. Е.В. Склярёва. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.
 23. *Sun S.S., McDonough W.F.* // Geol. Soc. London. 1989. Spec. Publ. 42. P. 313.
 24. *Kaygusuz A., Aslan Z., Aydinçakir E. et al.* // Lithos. 2018. V. 296–299. P. 332.
 25. *Karaoğlu Ö.* // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2014. V. 274. P. 16.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.01.013>
 26. *Seghedi I., Helvaci C.* // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2016. V. 327. P. 503.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.09.007>
 27. *Лебедев В.А., Вашакидзе Г.Т.* // Вулканология и сейсмология. 2014. № 2. С. 29.
 28. *Лебедев В.А., Чернышев И.В., Чугаев А.В.* // Геохимия. 2010. № 1. С. 45.
 29. *Pe-Piper G., Piper D.J.W.* The igneous rocks of Greece. The anatomy of an orogen. Berlin. Stuttgart: Gebruder borntraeger, 2002. 573 p.
 30. *Elburg M.A., Smet I., Van den haute P. et al.* // Lithos. 2018. V. 318–319. P. 386.
 31. *Хотылев А.О., Ольховский С.В., Майоров А.А., Хотылев О.В.* // Проблемы истории, философии и культуры. 2022. № 3 (77). С. 51.