

ТРЕНДЫ ЭВОЛЮЦИИ ВОСТОЧНО-АЗИАТСКОГО МУССОНА В СРЕДНЕМ-ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ ДИАТОМОВОГО АНАЛИЗА ОСАДКОВ ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ

В.С. Пушкар¹, М.В. Черепанова²,

¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

²Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, г. Владивосток

Аннотация. В настоящее время в Южно-Китайском море у восточных берегов Вьетнама и северо-западных берегов Филиппин наблюдаются соответственно активные летний и зимний муссонные апвеллинги. Для оценки изменений активизации и структуры верхних вод за последние 220 000 лет были проанализированы палеопродуктивность и экологические структуры комплексов диатомей из кернов скважин в этих регионах. Установлено, что увеличение палеопродуктивности диатомей соответствует активизации апвеллинга у восточного Вьетнама в межледниковые эпохи, а у северо-западных Филиппин в ледниковые эпохи. Это указывает на то, что в межледниковье летний муссон в Восточной Азии усилился, а зимний уменьшился. Установлено, что активность летнего муссона резко сокращается от начала МИС 5 к МИС 1, а тренд зимнего муссона прямо противоположен. Потоки эвригалинных диатомей и соотношение бентос / планктон восточнее Вьетнама постепенно снижаются от МИС 7 к МИС 1, что свидетельствует об ослаблении роли летнего муссона, тогда как северо-западнее Филиппин эти показатели возрастают. Таким образом, тренд Восточно-Азиатского муссона направлен на постепенное доминирование зимнего муссона

Ключевые слова: диатомеи, апвеллинг, Восточно-Азиатский муссон, Южно-Китайское море, плейстоцен.

MIDDLE-LATE QUATERNARY EVOLUTION TRENDS OF THE EAST ASIAN MONSOON ACCORDING TO DIATOM ANALYSIS OF THE SOUTH CHINA SEA SEDIMENTS

Pushkar V.S.¹, Cherepanova M.V.².

¹Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok

²Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Vladivostok

Abstract. Active summer and winter monsoon upwellings are currently observed in the South China Sea off the eastern coasts of Vietnam and the northwestern Philippines, respectively. The paleoproductivity and environmental patterns of diatom complexes from two cores in these regions were analyzed to assess changes in upwelling activation and structure over the past 220,000 years. The increase in diatom paleoproductivity was found to be consistent with upwelling activation in eastern Vietnam during interglacial epochs and in the northwestern Philippines during glacial epochs. This indicates that the summer monsoon in East Asia intensified and the winter monsoon decreased during the interglacial epoch. It is found that the summer monsoon activity decreases sharply from the beginning of MIS 5 to MIS 1, while the trend of the winter monsoon is just opposite. The flux of euryhaline diatoms and the benthic vs. plankton ratio east of Vietnam gradually decreases from MIS 7 to ISI 1, indicating a weakening role of the summer monsoon, while northwest of the Philippines these parameters increase. Thus, the trend activity is towards a gradual dominance of the winter monsoon.

Keywords: diatoms: upwelling, East Asian monsoon, South China Sea, Pleistocene

Введение. Южно-Китайское море как геосистема очень чутко реагирует на изменения окружающей среды и сигналы этих изменений хорошо сохранены в донных осадках. Именно поэтому

оно привлекает многих исследователей для восстановления палеоклиматических и палеоокеанографических изменений в Юго-Восточной Азии и прилегающих окраинных морей. При этом большое внимание уделяется карбонатным циклам, температуре поверхностных вод, палеоклиматам и муссонной активизации.

Было установлено, что продуктивность фораминифер в поверхностных водах сильно изменяется во время позднечетвертичных ледниково-межледниковых циклов в этом регионе. Оказалось, что палеопродуктивность выше в ледниковые эпохи, чем в межледниковые. Вероятная причина – увеличение поступления терригенных питательных веществ в ледниковые периоды, за исключением керна 17954 у берегов Восточного Вьетнама, где палеопродуктивность выше в межледниковые, чем в ледниковые периоды [1,2]. Высокая палеопродуктивность в межледниковые периоды соответствует летнему муссонному апвеллингу. Это позволяет использовать показатель палеопродуктивности для реконструкции изменений зимнего и летнего трендов Восточно-Азиатского муссона.

Целью настоящей работы является показать возможность использования диатомей в осадках Южно-Китайского моря в качестве критериев определения трендов летнего и зимнего Восточно-Азиатского муссона.

Материал и методы исследований. В настоящей работе для проведения диатомового анализа были использованы керны осадочных пород двух станций 17954 (14°47.8'с.ш., 111°31.5'в.д.) и 17928 (18°16.3'с.ш., 119°4.7'в.д.), отобранные с западного (у берегов Вьетнама) и восточного (у берегов Филиппин) склонов Южно-Китайского моря во время экспедиции Sonne 95 в 1994 году.

Глубины воды в точках 17954 и 17928 составляют 1515 м и 2484 м соответственно. Осадки в этих кернах представлены темно-серыми алевритами без признаков турбидитов и переотложения. Пробы керна 17954 были отобраны с интервалом 10 см, а керна 17928 – с интервалом 15 см. Всего было отобрано 101 образец.

При проведении диатомового анализа рассмотрены различные таксономические и структурно-экологические изменения в последовательных комплексах диатомей. Палеосукцессионные ряды в тысячелетней шкале выстроены по единому климатическому признаку, что позволяет при их корреляции использовать принцип гомотаксальности Гексли-Мейена в условиях рекуррентной последовательности (например, видовое разнообразие). Важными составляющими исследований являются изменение видового разнообразия и палеопродуктивности, отражающими тренды изменения температурного режима и структуры поверхностных вод.

Для определения палеопродуктивности диатомей в работе использован индекс палеопродуктивности (DP), который представляет собой функцию обилия диатомей в 1 грамме осадка (N), связанной со скоростью формирования осадков за тысячу лет:

$$DP (DAR) = N/1g \text{ sed.} \times I/kyr (Ng-1kyr-1 \text{ or } N/g \cdot kyr) \text{ или} \\ DP (DAR) = N/1cm^3 \times I/kyr (Ncm-2 \cdot kyr-1)$$

Этот индекс позволяет определять ледниковые и межледниковые эпохи формирования отложений. При этом считается, что высокая палеопродуктивность обычно коррелируется с межледниковьем в высоких широтах и ледниковой стадией в низких широтах (Jian, Huang, 2001). Кроме этого данный индекс позволяет определять зоны апвеллингов и их интенсивность вместе с видами-индикаторами.

В настоящей работе для оценки видового разнообразия DSP (рассматривается α -разнообразие) и его изменения в осадках использована энтропийная (информационная) функция Шеннона [3]

$$-H_j (S) = \sum p_i \lg p_i = \sum (n_i/n) \lg (n_i/n), \text{ где:}$$

j – номер образца в разрезе;

S – количество видов в j-ом образце (препарате);

n_i – количество створок каждого вида от первого до S-го в препарате j;

n – общее количество створок диатомей в препарате j.

Отношение n_i/n , часто обозначаемое как p_i , определяет значимость i-го вида в комплексе диатомей образца j.

Индекс Шеннона позволяет устанавливать сукцессии диатомовых палеосообществ, проследить их устойчивость и рубежи изменений в природной среде обитания.

Для определения палеотемпературных изменений поверхностных вод применен

температурный индекс Канайя-Коизуми [4]:

$$T_d = X_w / (X_w + X_c), \text{ где:}$$

T_d — диатомовый температурный индекс,

X_w — численность тепловодных диатомей,

X_c — численность холодноводных диатомей.

Возрастные модели на основе изотопно-кислородных кривым по бентосным и планктонным фораминиферам и пошаговая калибровка отложений по абсолютному возрасту взяты из опубликованных работ по кернам 17954 и 17928 Южно-Китайского моря (Jian et al., 2001, Huang et al., 2002).

Основанием для выделения возрастных комплексов диатомей послужили изменения их экологической структуры, выражающиеся в смене доминантов, субдоминантов и сопутствующих видов; изменениях соотношения представителей различных экологических групп диатомей, выделяемых по отношению диатомей к глубине обитания, солености, биогеографической приуроченности; колебаниях численности диатомей в осадках; изменениях содержания створок *Azpeitia nodulifera* диаметром >60 мкм.

Синтез полученных данных и лежит в основе выделения долгопериодических изменений в динамике апвеллингов, вызванных активностью или летнего, или зимнего муссонов.

Результаты и их обсуждение. Наиболее детально изучена колонка 17954. Исследовано 104 образца, отобранные через каждые 10 см. В целом было определено 229 видов диатомей. Наибольшее видовое разнообразие отмечено среди родов *Coscinodiscus* (18), *Nitzschia* (19), *Navicula* (16), *Thalassiosira* (16) и *Diploneis* (12). Среди всех видов преобладают северо-бореальные виды (57 таксонов), но эти виды отличаются от аналогичных в Северной Пацифике тонким строением панциря, поэтому мы имеем дело с морфологическим разнообразием (фенотипами) [5]. Южно-бореальная, субтропическая и тропическая группы включают 42, 21 и 46 таксонов соответственно. 50 таксонов характеризуются как космополиты, а 11 таксонов имеют неизвестное биогеографическое распространение. Бентосные и тихопелагические роды отличаются высоким видовым разнообразием (87 таксонов), а пелагические – 61 таксон. В зависимости от солености морские диатомовые включают 178 видов и 7 солоноватых видов. Пресноводные диатомовые водоросли включают 34 вида, но их распределение вдоль керна редкое и не такое высокое, как у морских видов.

Видовое разнообразие диатомей, их относительная численность и изменение экологической структуры диатомовых комплексов от тихопелагических до планктонных на протяжении всего интервала керна позволяют установить экостратиграфические единицы. Установлено 7 диатомовых комплексов, отражающих основные палеогеографические события (палеоклиматы, изменения продолжительности летних и зимних муссонов, активизация палеоапвеллинга) и соответствующих 1-7 морскими изотопными стадиями (МИС) от самой древней до самой молодой.

Полидоминантность представленных палеосообществ отражает, скорее всего, разнообразие сезонных условий развития диатомей. Так в теплые периоды года более активно продуцировали эвригалинные *Cyclotella striata* и *Paralia sulcata*., а в более холодные и влажные – стеногалинные *Thalassionema nitzschioides* + var. и *Azpeitia nodulifera*.

Комплекс VII (1110-940 см) и по времени своего формирования соответствует МИС-7. Доминирует *Cyclotella stylogum* (до 92,0%). Остальные виды в основном представлены единичными створками, лишь немногие имеют оценку обилия больше 1%. Видовое богатство невысокое – 6-17 таксонов, – $H_j(S) = 4,5$. Содержание створок диатомей N изменяется от 0 до 0,7 млн. ств./1 г осадка ($DAR = 10 \times 10^3$). Возможно, что столь низкая продуктивность диатомей связана с какими-либо сезонными явлениями (паводками или половодьями), в результате которых в море поступало большое количество терригенного материала, который сильно сокращал численность диатомей. Высокое обилие *Cyclotella stylogum*, обитающей в субтропических прибрежных водах морей, может служить доказательством солености, близкой к океанической, и повышенных температур поверхностных вод.

Комплекс VI (940-800 см). Отличается от предыдущего в резком изменении численности *Cyclotella stylogum* до 4,5%. Этот вид постепенно вытеснялся субтропическим пелагическим видом *Azpeitia nodulifera* (до 72,2%). В роли субдоминантов выступают: в нижней части

интервала *Cyclotella striata* (до 21,6%), вверх по разрезу *Cyclotella stylonum* (11,8-25,7%). Оценки обилия других видов невысоки: *Coscinodiscus radiatus* (3,4%), пелагическая субтропическая *Thalassiosira leptopus* (3,1%), неритические северо-бореальные *Th. angulata* (3,2%), *Th. eccentrica* (3,1%). Исчезает тихопелагическая эвригаллиная *Paralia sulcata*. Видовое разнообразие палеосообществ возрастает (29-37 таксонов). Выше становится и содержание створок диатомей в осадках – 0,4-3,4 млн. ств./1 г. $DAR = 25 \times 10^3$. – $H_j(S) = 2,1$. Такие кратковременные изменения численности некоторых видов свидетельствуют о нестабильности палеосреды. Абсолютное число диатомей N возросло до $3,4 \times 10^6$ клапанов.

Комплекс V (800-625 см) соответствует МИС 5. Неоднократная смена экологических структур свидетельствует о его неоднородности, отражающей палеоклиматические подстадии (а, с, е). Доминантами палеосообщества становятся *Cyclotella stylonum* (41,7-81,8%), *C. striata* (45,7%) и *Paralia sulcata* (31,5%). Встречаются часто *Azpeitia nodulifera* (до 11,8%) и *Coscinodiscus radiatus* (1,6-4,7%). Из пелагических видов единичными створками встречены тропические *Coscinodiscus africanus*, *Rhizosolenia bergonii*, *Thalassiosira leptopus*.

Видовое разнообразие вверх по разрезу увеличивается до 28 таксонов. Содержание диатомей N изменяется от 0,1 до 0,7 млн. ств./1 г осадка и, как видно, остается незначительным. $DAR = 10 \times 10^3$, – $H_j(S) = 2,6$.

Условия формирования данного палеосообщества были явно более теплыми и сухими, по сравнению с предыдущим. Высокие температуры в течение всего года сокращали благоприятный период для вегетации диатомей. Это снижало содержание в воде питательных веществ, необходимых для активной жизнедеятельности диатомей.

Комплекс IV (625-410 см) соответствует МИС 4. В доминирующую группу комплекса входят *Cyclotella striata* (13,3-43,8%), *C. stylonum* (11,2-57,3%), *Thalassionema nitzschioides* (5,2-18,2%) + *Th. nitzschioides* var. *parva* (3,4-7,0%), *Paralia sulcata* (1,4-36,1%), *Azpeitia nodulifera* (3,8-25,3%). Встречаются часто *Cyclotella stylonum* (2,3-12,4%), *Thalassiosira eccentrica* (1,7-6,8%), *Th. angulata* (2,7-6,8%), *Thalassiothrix frauenfeldii* (1,5-6,8%), *Coscinodiscus radiatus* (0,7-4,2%). В комплексе очень разнообразна сублиторальная флора диатомей, которая представлена *Nitzschia capitellata* (1,9%), *Rhabdonema arcuatum* var. *ventricosa*, *Navicula spectabilis*, *Diploneis weissflogii* (2,3%), *Trachyneis aspera* var. *contermina*, *T. antyllarum* и др.

Видовое богатство высокое – 33-54 таксонов. Содержание диатомей в осадках N – 1,5-5,0 млн. ств./1 г. ($DAR = 75 \times 10^3$). – $H_j(S) = 1,6$.

Комплекс III (410-240 см). Соответствует МИС 3. Доминирует *Azpeitia nodulifera* (21,4-61,8%), *Cyclotella striata* (12,5-35,4%), *Thalassionema nitzschioides* (3,5-17,3%). Относительно обильны *Thalassiosira eccentrica* (3,5-7,7%), *Th. oestrupii* (0,8-3,9%), *Th. angulata* (1,8-3,8%), *Coscinodiscus radiatus* (2,9-3,8%), *Cyclotella stylonum* (2,4-9,5%), *Thalassiothrix frauenfeldii* (2,8-3,5%), *Nitzschia marina* (1,8-3,5%).

Видовое богатство высокое – 53-66 таксонов. Содержание диатомей N – 9,1-12,7 млн. ств./1 г осадка ($DAR = 65 \times 10^3$). – $H_j(S) = 1,2$.

В целом палеосообщества выделенного интервала развивались в условиях, близких современным.

Комплекс II (240-120 см). Соответствует МИС 2. Палеосообщество данного интервала бидоминантное. В нем наиболее обильны *Azpeitia nodulifera* (15,5-45,5%) и *Cyclotella striata* (14,7-23,6%). Встречается часто *Coscinodiscus radiatus* (1,9-11,7%), *Thalassionema nitzschioides* (4,0-9,1%). Обычными являются *Thalassiosira eccentrica* (3,6-6,7%), *Th. angulata* (3,8-5,9%), *Th. leptopus* (2,1-3,1%), *Cyclotella stylonum* (3,1-3,6%), *Actinocyclus ehrenbergii* var. *tenella* (2,2-3,9%), *Coscinodiscus perforatus* (0,8-3,9%), *Nitzschia marina* (3,6-6,4%). Необходимо отметить высокое видовое богатство сублиторальных бентосных видов: *Odontella aurita*, *Diploneis smithii*, *D. crabro*, *D. bombus*, *Surirella fastuosa*, *Cocconeis scutellum*, *Mastogloia splendida*, *Nitzschia panduriformis* и др., а также пресноводных *Stauroneis producta*, *Rhopalodia gibberula* и пр.

В этом интервале отмечается самое видовое богатство – 72 таксона (– $H_j(S) = 0,5$) и высокая численность диатомей N – 46,4 млн. ств./1 г осадка. $DAR = 190 \times 10^3$.

Учитывая тот факт, что диатомовые водоросли наиболее активно развиваются в водах умеренных широт, можно предположить, что температурный режим поверхностных вод Южно-Китайского моря во время формирования отложений данного интервала был близок современному температурному режиму южной части Японского моря. Активное участие в комплексе южно-бореальных видов (52.1%) свидетельствуют о снижении температуры поверхностных вод. И хотя пелагические виды представлены очень разнообразно, оценки обилия их низки. Вместе с тем, роль неритических и сублиторальных видов возрастает вверх по разрезу. Это говорит о направленном понижении уровня моря прогрессирующем похолодании и свидетельствует о снижении активности гидродинамики в исследуемом районе, об ослаблении связи моря с окружающими морями. Увеличивается инсоляция. Уменьшается количество атмосферных осадков. Повышается соленость поверхностных вод.

Комплекс I (интервал 120-0 см) соответствует МИС 1. Доминирует *Azpeitia nodulifera* (17.2-43.6%). Встречаются часто *Thalassiothrix frauenfeldii* (3.7-10.0%), *Coscinodiscus radiatus* (0.4-7.1%), *Cyclotella striata* var. *striata* (1.6-8.1%), *Thalassionema nitzschioides* var. *parva* (0.4-6.8%), *Thalassiosira eccentrica* (2.2-4.5%), *Th. leptopus* (1.1-4.2%).

В палеосообществе преобладают пелагические виды (44.1-44.9%) родов *Coscinodiscus*, *Asteromphalus*, *Asterolampra*, *Thalassiosira*. Встречены также сублиторальные бентосные *Campylodiscus brightwellii* (1.0%), *Diploneis crabro* (1.3%), единичными створками *Cocconeis vitrea*, *C. costata*, *Rhaphoneis amphiceros*, *Pleurosigma diverse-striatum*, *Ardissonia crystallina* и др., а также пресноводные *Achnanthes delicatula* var. *hauckiana*, *Hantzschia amphioxys*.

Видовое разнообразие высокое – 59-69 таксонов ($-H_j(S) = 0,5$). Содержание диатомей в осадках N – 9.1-11.6 млн. ств./1 г. DAR = 655×10^3 .

Представленный комплекс обладает экологической структурой, близкой современной диатомовой флоре. Он формировался в условиях активной гидродинамики. На него оказывали влияния и вынос рек, и обмен водными массами между разными частями Южно-Китайского моря и окружающими морями.

Выводы. Среднеплейстоценовые этапы палеокеанографии Южно-Китайского моря отличаются от позднеплейстоценовых и голоценовых резким изменением солености от менее соленой до нормальной океанической. Ярким подтверждением этого является преобладание в комплексах 7-6 эвригалинных диатомей, которые в позднем плейстоцене сменились стеногалинными диатомовыми ассоциациями. Высокая соленость в позднеплейстоценовое время может быть объяснена преобладанием процессов испарения над речным и дождевым стоком. Влияние вод реки Меконг было сильнее в среднеплейстоценовую эпоху. Как видно, появление пресноводных диатомей четко совпадает с ледниковыми периодами. Подобная ситуация отмечена и в отложениях 5 и 3 МИС, где появление пресноводных диатомей, совпадает с межэтапными похолоданиями.

Появление пресноводных диатомей следует объяснять не тектоническими процессами или изменениями уровня моря, а активизацией речного стоком, вызывающим усиление эрозионных процессов в прибрежных зонах западной части Южно-китайского моря.

Функционирование и динамика зон апвеллинга обеспечивается интенсификацией летнего и зимнего Восточно-Азиатского муссонов. Подтверждено, что усиление потока палеопродуктивности и видового разнообразия диатомей соответствует усилению апвеллинга у восточного побережья Вьетнама во время межледниковья, а у северо-западного побережья Филиппин во время ледниковых периодов. Установлено, что усиление активности летнего Восточно-Азиатского муссона и снижение активности зимнего происходило во время межледниковых изотопных стадий. В частности, самая высокая активность апвеллинга восточнее Вьетнама отмечена во время морской изотопной стадии (МИС) 5, а у берегов северо-западных Филиппин – во время ледниковой стадии 2.

Активность летнего муссона резко сокращается от начала МИС 5 к МИС 1, а тренд зимнего муссона прямо противоположен. Поток эвригалинных диатомей и соотношение бентос/планктон восточнее Вьетнама постепенно снижаются от МИС 7 к МИС 1, что свидетельствует об ослаблении роли летнего муссона, тогда как северо-западнее Филиппин эти показатели возрастают. Таким образом, тренд направлен на постепенное доминирование

зимнего муссона. Направленные вариации в динамике апвеллингов показывают различную цикличность с частотой около 41 ка и 23 ка у Вьетнама, в отличие от частотного пика около 100 ка северо-западнее Филиппин.

Предполагается, что интенсификация Восточно-Азиатского летнего муссон подчинена изменениям в солнечной инсоляции и орбитальных параметров (прецессия и наклонение оси), в то время как объем льда в ледниковые периоды и соответствующие мировые регрессии моря является главным фактором увеличения активности зимнего муссона, но с менее важным влиянием солнечной инсоляции.

Благодарности. *Выражаем глубокую признательность профессорам Zhimin Jian и Baoqi Huang (Лаборатория морской геологии Университета Tongji, Шанхай, КНР) за предоставленный для проведения диатомового анализа керн станций 17954 и 17928 и обсуждение полученных результатов.*

Литература

1. Zhimin Jian, Baoqi Huang, Wolfgang Kuhnt, Hui-Ling Lin. Late Quaternary Upwelling Intensity and East Asian Monsoon Forcing in the South China Sea // Quaternary Research. 2001. Vol. 55. P. 363-370.

2. Baoqi Huang, Zhimin Jian, Xinrong Cheng, Pinxian Wang. Foraminiferal responses to upwelling variations in the South China Sea over the last 220 000 years // Marine Micropaleontology. 2002. Vol. 47. P. 1-15.

3. Пушкарь В.С., Черепанова М.В. Диатомеи плиоцена и антропогена севера Пацифики. Владивосток: Дальнаука, 2001. 222 с.

4. Kanaya T., Koizumi I. Interpretation of diatom thanatocoenoses from the North Pacific applied to study of core V20-130 (Studies of deep-sea core V20-130. Part IV) // Sci. Rep. Tohoku Univ. Sec. Ser. 1966. V. 37(2). P. 89-130.

5. M. V. Cherepanova, M. V. Usol'tseva, V. S. Pushkar, and Yu. F. Dubrovina. Morphogenesis in *Cyclotella ocellata* Complex from Lake El'gygytgyn (Chukchi Peninsula) during the Pleistocene–Holocene // Paleontological Journal. 2010. Vol. 44. No. 10, P. 1–10.