

Работы молодых ученых

УДК 561.26:551.583.7:551.782.1(571.63)

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ДИАТОМОВОЙ ФЛОРЫ ЮЖНОГО ПРИМОРЬЯ В МИОЦЕНЕ И ИХ СВЯЗЬ С ИЗМЕНЕНИЯМИ КЛИМАТА И ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ СОБЫТИЯМИ

© 2016 О.Ю. Лихачева¹, А.С. Авраменко^{2,3}¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, 690022; e-mail: olesyalikh@gmail.com²Биолого-почвенный институт ДВО РАН, Владивосток, 690022; e-mail: alexa25rus@gmail.com³Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690922

Настоящая статья посвящена исследованию диатомовых водорослей из миоценовых отложений Южного Приморья. Анализ изменений содержания створок диатомей в осадках, таксономического состава и экологической структуры диатомовых палеосообществ позволил выделить шесть диатомовых комплексов, которые отражают шесть этапов развития южноприморской диатомовой флоры в миоцене, обусловленных колебаниями климата и региональными тектоническими факторами. Реконструированы условия обитания диатомей в миоцене.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, миоцен, палеоклимат, Южное Приморье.

Диатомовые водоросли, или диатомеи — это одноклеточные растения размером от нескольких микрон до первых миллиметров, живущие в любой водной среде и чутко реагирующие на изменения ее параметров. Эти микроскопические существа защищены панцирем из кремнезема, который хорошо сохраняется в осадках. Именно поэтому данная группа микроорганизмов считается наиболее информативной при расшифровке палеогеографической истории отдельных регионов и Земли в целом. Опираясь на один из основных принципов стратиграфии — принцип актуализма, при восстановлении условий палеосреды сведения об экологических предпочтениях ныне живущих диатомей проецируются на ископаемые организмы.

Миоцен, ставший переломным рубежом в формировании современной климатической системы Земли, представляет большой интерес с позиций формирования биоты. Климат миоцена характеризовался неустойчивым состоянием, выразившимся в чередовании кратковременных эпизодов похолоданий и потеплений. Самое заметное потепление в течение неогена известно как среднемиоценовый климатический оптимум, во время которого земные температуры

были теплее, чем сегодня. После оптимума началось глобальное похолодание, приведшее к экологическим изменениям по всему миру (Zachos et al., 2001). В частности, такие тенденции в изменении климата отмечены и для миоцена Приморья (Короткий и др., 1996; Павлюткин, Петренко, 2010; Павлюткин и др., 2004).

На облик ископаемых, в том числе и диатомовых, сообществ в миоцене Приморья повлияли не только орбитальные климатообразующие факторы, но и региональные процессы. Это поднятие Гималаев, которое началось около 20 млн л. н. (Буртман, 2012; Rowley, 1996) и обусловило формирование муссонного климата с характерными мощными потоками летнего и зимнего муссонов (Короткий и др., 1996; Лихачева и др., 2009); раскрытие Япономорской впадины и образование системы теплых и холодных течений (Павлюткин, Голозубов, 2010); тектоническое развитие Сихотэ-Алинской горной системы, в западной части которой появляются впадины, и развивается речная сеть высоких порядков (Павлюткин, Петренко, 2010).

Целью настоящего исследования являлось детальное изучение особенностей диатомовой флоры Южного Приморья для установления

ее эволюционных этапов, обусловленных климатическими изменениями и геологическими событиями, происходившими в миоцене.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отложения нижнего миоцена в Южном Приморье представлены синеутесовской (Синеутесовская впадина) и нежинской (Пушкинская впадина), среднего миоцена — новокачалинской (Турьерогская впадина), а верхнего миоцена — усть-суйфунской (Пушкинская впадина) свитами (рис. 1). В настоящей работе диатомовые

водоросли изучены из всех указанных свит. Проведенные ранее исследования в этом регионе (Лихачева, 2013; Лихачева и др., 2009), когда были изучены наиболее представительные разрезы, включая и голостратотипы (Павлюткин, 2008; Павлюткин, Петренко, 2010), были дополнены новыми данными: с помощью применения электронной микроскопии уточнен таксономический состав диатомей; определено количественное участие отдельных таксонов и представителей экологических групп.

Абсолютный возраст отложений установлен по результатам трекового анализа и радиоизо-

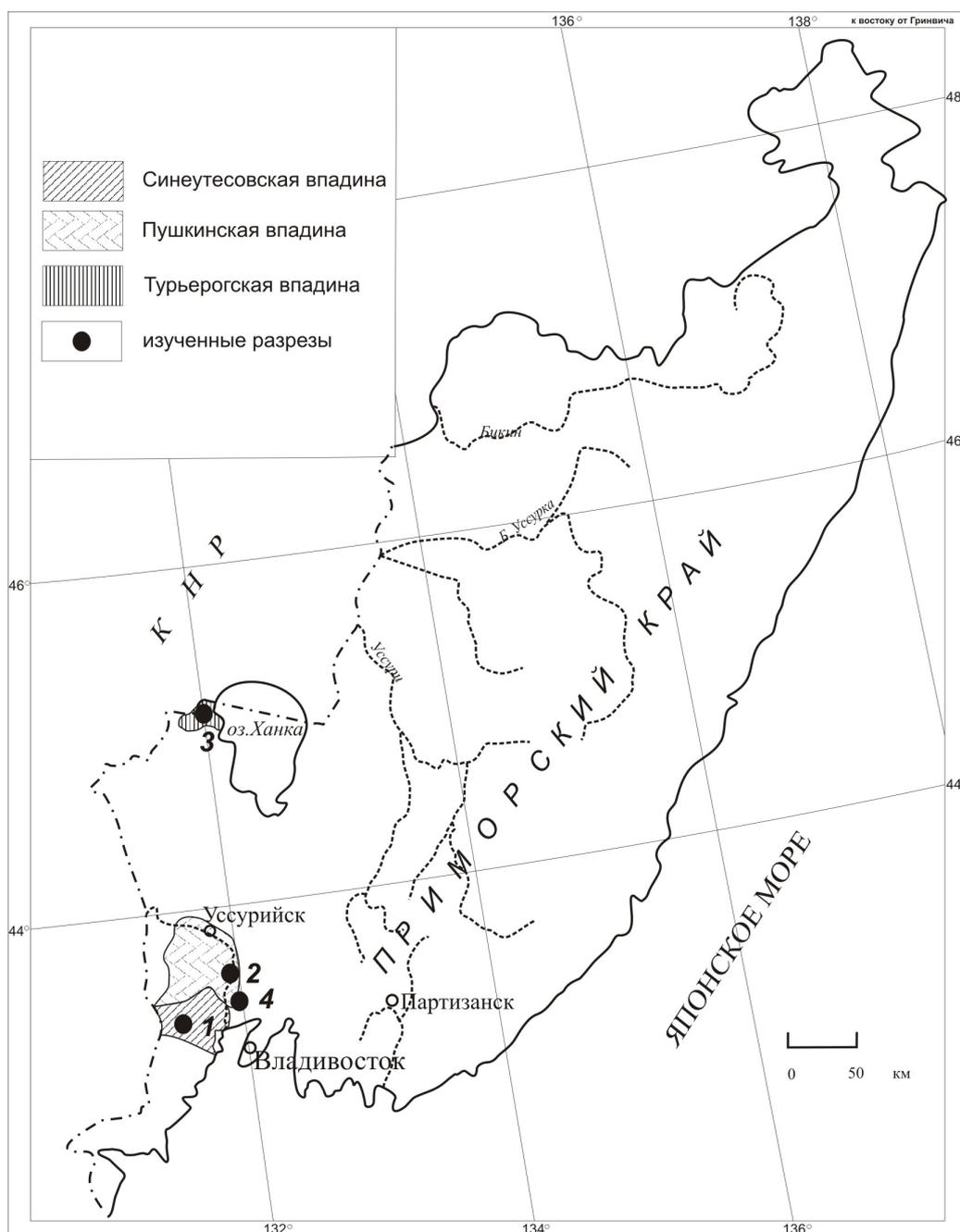


Рис. 1. Местонахождение разрезов изученных свит: 1 — синеутесовской (ранний миоцен), 2 — нежинской (ранний миоцен), 3 — новокачалинской (средний миоцен), 4 — усть-суйфунской (первая половина позднего миоцена).

топного датирования. Так, возраст базальтов, перекрывающих синеутесовскую свиту, по данным калий-аргонового датирования составляет 22 ± 1.0 млн лет (Попов и др., 2005) и соответствует аквитанскому ярусу (23.03–20.43 млн лет, начало раннего миоцена). Для нежинской свиты трековым методом по циркону получены следующие датировки — 18.8 ± 1.1 , 19.7 ± 1.1 , 20.2 ± 0.8 , 20.9 ± 1.1 млн лет, которые позволяют отнести ее к концу раннего миоцена (Павлюткин и др., 1993; Павлюткин, Петренко, 2010). Серия датировок в интервале 14.9 — 15.1 млн лет, установленная для комплекса новокачалинской свиты, относит её к среднему миоцену (Павлюткин и др., 2004). Нижняя граница усть-суйфунской свиты определяется калий-аргоновой датировкой 12.3 млн лет, полученной по монофракции вулканического стекла (Павлюткин и др., 1999). Возраст усть-суйфунской свиты датирован по вулканическим стеклам трековым методом (10.8 ± 1.1 и 11.8 ± 0.9 млн лет) и соответствует первой половине позднего миоцена (Павлюткин и др., 1985).

В настоящей статье, принято разделение миоцена на три подотдела: нижний, средний, верхний в соответствии со Стратиграфическим кодексом России (2006).

Для более объективных реконструкций среды, кроме диатомовых, были привлечены также макрофлористические и палинологические данные (Павлюткин, Петренко, 2010).

Техническая обработка образцов для диатомового анализа и приготовление постоянных препаратов с целью изучения в световом микроскопе (СМ) осуществлялись по общепринятой методике (Диатомовые ..., 1974). Определение таксонов, а также изучение экологической структуры диатомовых палеосообществ были проведены с помощью световых микроскопов Amplival Carl Zeiss и Axioskop 40 Carl Zeiss при увеличении $\times 1000$ в Центре коллективного пользования (ЦКП) Биолого-почвенного института (БПИ) ДВО РАН.

В каждом препарате подсчитывали более 500 створок, которые использовались для выяснения степени участия отдельных таксонов в диатомовых палеосообществах. При этом было принято подразделение диатомей, предложенное Н.Н. Давыдовой (1985): единичными считали виды с оценкой обилия менее 1%, обычными от 1 до 5%; массовыми — более 5%. К доминантам относили таксоны, содержание которых в палеосообществах превышало 10%, а к субдоминантам — от 5 до 10%.

Более точная видовая диагностика диатомей проводилась с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) EVO 40 Carl Zeiss при увеличении до $\times 15000$ (ЦКП БПИ ДВО РАН).

В работе использована классификация диатомовых водорослей, принятая российскими диатомологами (Диатомовые ..., 1992; Диатомовые ..., 2008) с учетом ревизии ряда родов и видов (Кузьмин и др., 2009; Williams, 1996). Эколого-географические характеристики некоторых таксонов взяты из перечисленных публикаций и монографии С.С. Бариновой с соавторами (2006).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленные нами изменения таксономического состава, доминантов палеосообществ, количественного соотношения планктонной и бентосной групп позволили выделить шесть комплексов диатомей, которые соответствуют эволюционным этапам развития диатомовой флоры Южного Приморья в миоцене и отражают климатические изменения в регионе.

Ранний миоцен. Диатомей, изученные из отложений последовательно залегающих синеутесовской и нежинской свит, отнесены к двум одноименным комплексам (рис. 2).

В самом начале раннего миоцена (синутесовский комплекс, I этап развития диатомовой флоры Южного Приморья) в диатомовых палеосообществах доминировали древние планктонные представители рода *Aulacoseira* группы «prae» (до 52.3%) (рис. 2; 4a), среди которых наиболее обильна *A. praegrnulata* var. *praeislandica* f. *praeislandica* (Sim.) Moiss. (до 42.6%), (рис. 3, фиг. 4). С меньшими оценками обилия встречены *A. praegrnulata* var. *praeangustissima* (Jousé) Moiss. f. *praeangustissima* (до 4.3%), *A. praegrnulata* var. *praeangustissima* f. *curvata* (Jousé) Moiss. (до 1.5%), *A. praegrnulata* var. *praeislandica* f. *curvata* (Jousé) Moiss. (1.1%), а также представители родов *Actinella* (*A. brasiliensis* Grun. (4.5%)), *Melosira* (*M. undulata* (Ehr.) Kütz. var. *undulata* (2.7%), рис. 3, фиг. 2) и бентосного рода *Tetracyclus* (до 12.3%): *T. ellipticus* var. *lancea* f. *lancea* (Ehr.) Hust. и f. *subrostrata* Hust. и *T. ellipticus* var. *clypeus* (Ehr.) Hust. На этом этапе в палеосообществах отмечено появление новых видов: *Aulacoseira canadensis* (Hust.) Sim. (рис. 3, фиг. 1) до 3.1%, *A. ovata* Usolteva et Tsoy (рис. 3, фиг. 5, 6) до 2.7%, *Miosira bifaria* (Nevret. et Moiss.) Khurs. до 1.2%.

В палеосообществах конца раннего миоцена (нежинский комплекс, II этап) также доминируют представители древнего рода *Aulacoseira* группы «prae» — 66.3%, (рис. 2; 3, фиг. 4; 4a), встречена в массе *Actinella brasiliensis* Grun. (до 6.3%); увеличивается таксономическое разнообразие рода *Tetracyclus*, представленного *T. celatom* Okuno, *T. lacustris* Ralfs., *T. ellipticus* var. *ellipticus* (Ehr.) Hust., *T. ellipticus* var. *clypeus*; обычны виды родов *Desmogonium* (*D. guianense*

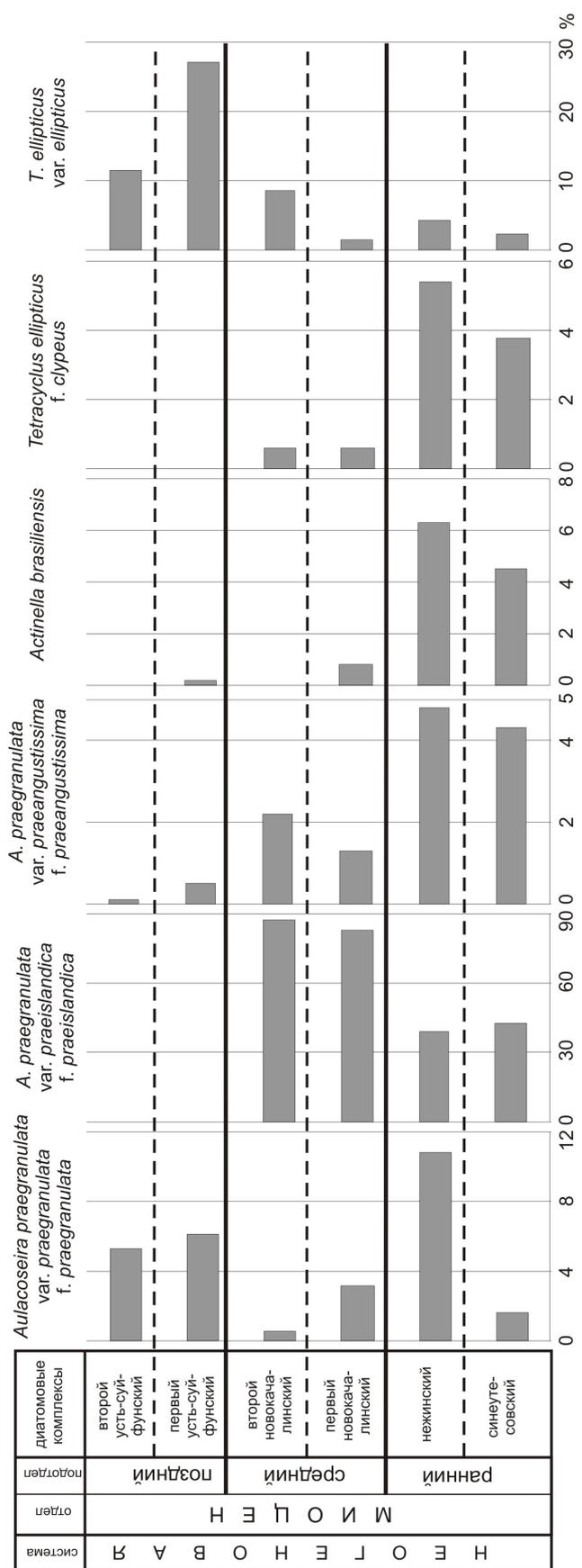


Рис. 2. Распределение доминирующих таксонов диатомей в миоценовых отложениях изученных разрезов.

Ehr. (2.9%), *D. rabenhorstianum* Ost. (2.3%), *Sellaphora* (*S. americana* (Ehr.) Mann — до 2.4%) и *Actinocyclus* (*A. lobatus* (Rubina) Rubina et Khurs. — 1.4%, (рис. 3, фиг. 3)), отсутствующий в более молодых отложениях (Лихачева и др., 2009).

Для осадков характерно значительное содержание диатомовых створок, которое было обусловлено высокой продуктивностью диатомей, связанной, с мощным проявлением кислого вулканизма, зафиксированного в Приморье в это время (Чекрыжов, 2009). Участие в раннемиоценовых комплексах теплолюбивых видов (*Actinella brasiliensis*, *Aulacoseira ovata*, представителей родов *Desmogonium* и *Sellaphora*) свидетельствует о начавшейся после позднеолигоценового похолодания фазе потепления. Надо отметить, что важным стратиграфическим признаком является участие в комплексе *Aulacoseira ovata*, которая характерна для нижнемиоценовых отложений возвышенности Ямато (Usoltseva, Tsoy, 2010). Высокая частота встречаемости планктонных форм родов *Aulacoseira*, *Melosira* и *Miosira* (рис. 4a) отражает озерные условия формирования отложений, а присутствие реофильных диатомей родов *Tetracyclus*, *Fragilariforma* и *Staurosira* — о значительном влиянии речного стока на озерный бассейн.

Подобные тенденции развития климата зафиксированы и по данным изучения листовой флоры, а также спор и пыльцы. Для растительности региона этого времени был характерен теплоумеренный облик, установленный по доминированию ильмовых, березовых и кленовых при заметном участии бука. На завершающем этапе раннего миоцена отмечена выраженная термофильность листовой флоры: из 57 родов, встреченных в отложениях, 17 родов, среди которых *Magnolia*, *Liquidambar*, *Celtis*, *Fagus*, *Castanea* и др., характерны для современных флор субтропиков и теплоумеренной области. В спорово-пыльцевых спектрах содержание пыльцы покрытосеменных, представленных в основном березовыми, в меньшей степени ореховыми и ильмовыми, либо преобладает (до 85%) над пыльцой голосеменных, либо они встречаются в равных количествах, при этом участие спор невелико. Доминирующее значение (до 31%) имеет пыльца *Fagus* (Павлюткин, Петренко, 2010).

Средний миоцен. Для отложений этого возраста выделены два комплекса диатомей.

Для комплекса начала среднего миоцена (первый новокачалинский комплекс, III этап) характерно довольно высокое видовое разнообразие. Встречено 75 видов, принадлежащих 41 роду. Туфодиатомитовые слои формирует *A. praeaeangustata* var. *praeaeangustata* f. *praeaeangustata* (рис. 2; 5, фиг. 1, 8), участие этой формы в палеосообществах достигает 82.7%. Остальные

таксоны встречены со значительно меньшими оценками обилия: *A. praegr anulata* (Jousé) Sim. var. *praegr anulata* f. *praegr anulata* до 3.2 % (рис. 5, фиг. 2, 6), *A. praegr anulata* var. *praeangustissima* (Jousé) Moiss. f. *praeangustissima* до 1.3%, представители рода *Aulacoseira* с курватными створками: *A. praegr anulata* var. *praeislandica* f. *curvata* до 1.5 % (рис. 5, фиг. 9), *A. praegr anulata* var. *praegr anulata* f. *curvata* до 1.3 %. Появляется *A. italica* f. *curvata* (Pant.) Hust., а также таксоны родов *Actinocyclus*, *Mesodictyon* и *Ellerbeckia* (*E. kochii* (Pant.) Moiss., содержание которой составляет 0.6% (рис. 5, фиг. 3)). Участие таких субтропических видов как *Actinella brasiliensis*, *A. punctata* F.W. Liwis, *Symbella australica* (A.S.) Cl., *Desmogonium guianense*, *D. rabenhorstianum*, *Sellaphora americana* (рис. 5, фиг. 4) не превышает 1%.

Комплекс диатомей второй половины среднего миоцена (второй новокачалинский комплекс, IV этап) отличается от предыдущего отсутствием многих субтропических диатомей, а также значительным увеличением разнообразия и частоты встречаемости бентосных диатомей, особенно родов *Tetracyclus* (рис. 5, фиг. 5, 7), *Staurosira*, *Planothidium* — типичных реофильных форм. Среди тетрациклюсовой флоры доминирует *T. ellipticus* var. *ellipticus* (рис. 2), участие остальных представителей этого рода незначительно. Особенностью этого комплекса является также выпадение из него планктонной *Miosira jouseana* (Moiss.) Krammer, Lange-Bert. et Schiller и увеличение частоты встречаемости *M. areolata* Khurs.

Выявленный контраст комплексов может быть объяснен сменой палеогеографических

условий. Формирование первого новокачалинского комплекса с преобладанием планктонных диатомей (рис. 4а) соответствует времени миоценового климатического оптимума, а второй комплекс, отличающийся высоким участием бентосных пеннатных таксонов (рис. 4а), отвечает похолоданию второй половины среднего миоцена, последовавшему после значительного потепления. Именно для этого времени, как отмечено в работах (Лихачева и др. 2009; Павлюткин и др. 2004), на фоне прогрессирующего похолодания происходило активное развитие широкой сети речных долин, что обусловило преобладание озерно-аллювиального седиментогенеза над типичным озерным.

Еще одним показателем меняющихся условий послужили морфологические исследования створок доминирующей *A. praegr anulata* var. *praeislandica* f. *praeislandica*. Для данного таксона из палеосообществ среднего миоцена была выявлена высокая морфологическая вариабельность створок. На основе детального их изучения в СЭМ выделено две обособленные совокупности. В первую объединены створки с высоким загибом и небольшим диаметром, а во вторую — с низким загибом и большим диаметром. Содержание створок, отнесенных к первой группе, в первом новокачалинском комплексе составляет 77.8%, второй — 22.2%, а в палеосообществах второго комплекса — 86.8% и 13.2% соответственно. Установленные морфологические различия могут свидетельствовать о ярко выраженной сезонности в течение года, характерной для того времени. И каждая из морфологических групп, предпочитая конкретные экологические

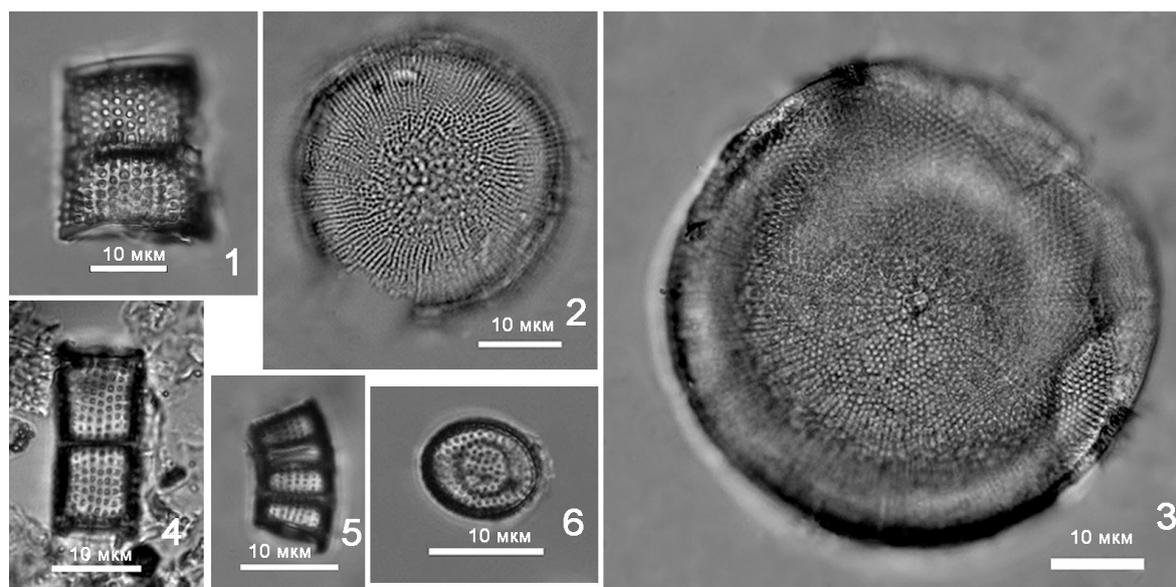


Рис. 3. Доминирующие и стратиграфически важные диатомеи из синутесовского и нежинского комплексов (ранний миоцен): 1–7 — планктонные диатомеи: 1 — *Aulacoseira canadensis* (Hust.) Sim., 2 — *Melosira undulata* (Ehr.) Kütz. var. *undulata*, 3 — *Actinocyclus lobatus* (Rubina) Rubina et Khurs., 4 — *A. praegr anulata* var. *praeislandica* (Sim.) Moiss., 5, 6 — *A. ovata* Usolteva et Tsoy. Фото 1–6 — СМ.

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ДИАТОМОВОЙ ФЛОРЫ

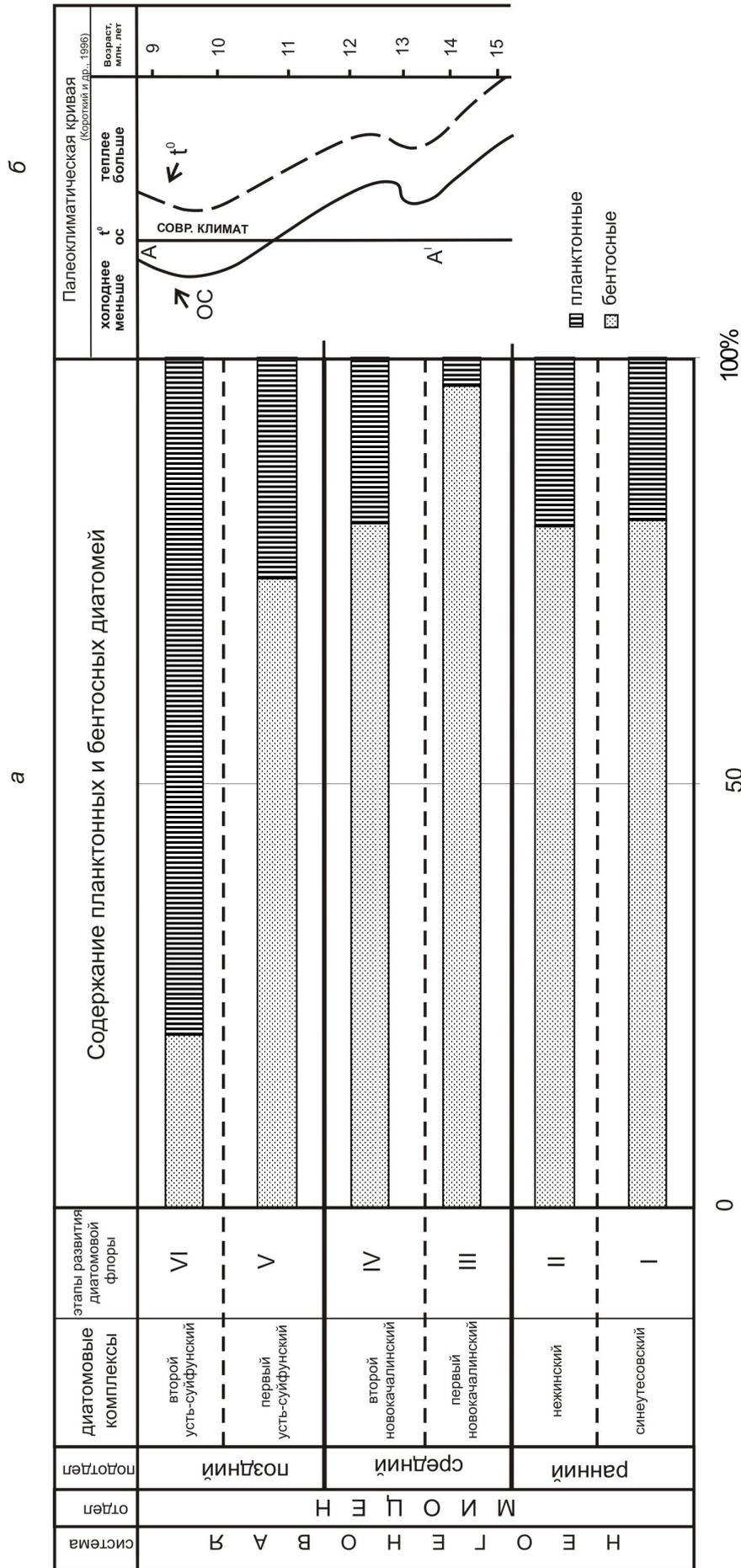


Рис. 4. Содержание планктонных и бентосных таксонов в комплексах, характеризующих выделенные этапы развития диатомовой флоры (а) и их корреляция с палеоклиматической кривой А.М. Короткого с соавторами (1996) (б): t° — температура современного климата; А-А' — линия современного климата; ос — осадки на континенте для среднего и первой части позднего миоцена.

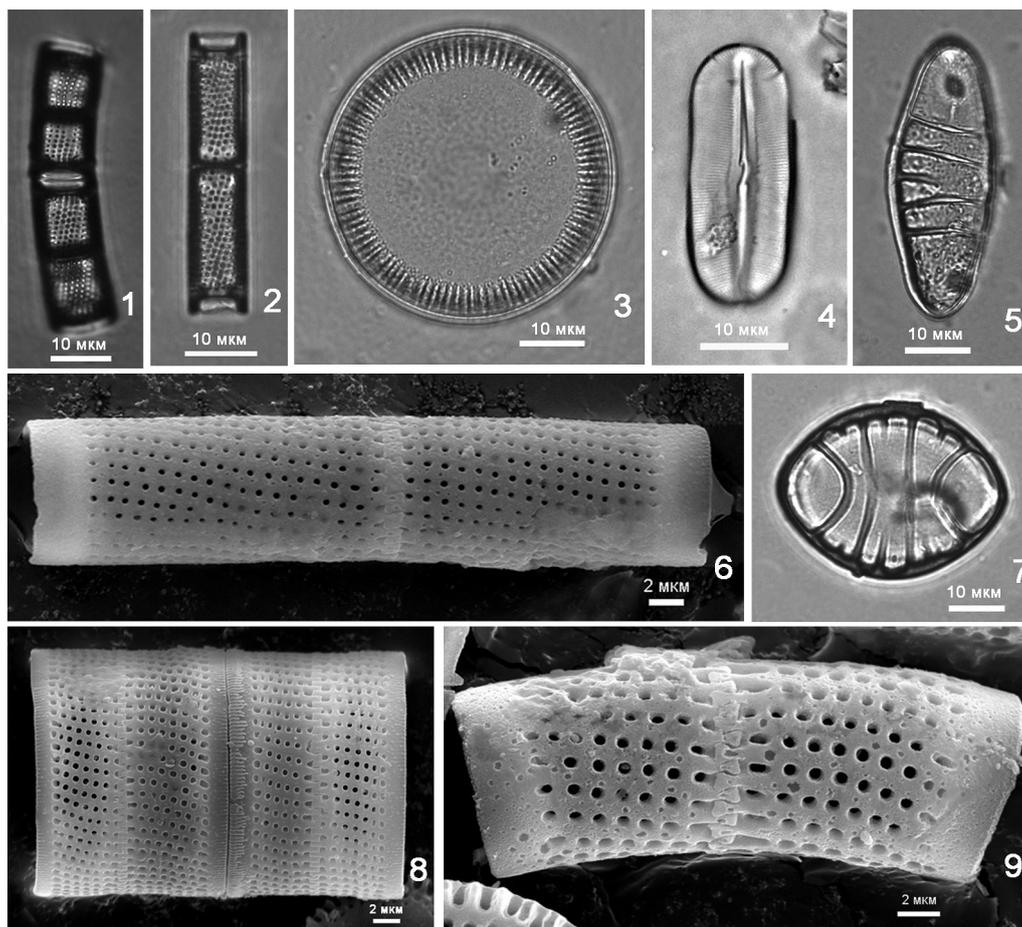


Рис. 5. Диатомеи из первого и второго новокачалинских комплексов (средней миоцен): 1, 8 — *Aulacoseira praegranulata* var. *praeislandica* f. *praeislandica* (Sim.) Moiss., 2, 6 — *A. praegranulata* (Jousé) Sim. var. *praegranulata* f. *praegranulata*, 3 — *Ellerbeckia kochii* (Pant.) Moiss., 4 — *Sellaphora americana* (Ehr.) Mann, 5 — *Tetracyclus lacustris* var. *lanceolatus* Moiss., 7 — *Tetracyclus excentricum* (Ehr.) Williams, 9 — *Aulacoseira praegranulata* var. *praeislandica* f. *curvata* (Jousé) Moiss. Фото 1 — 5, 7 — СМ; 6, 7, 8 — СЭМ.

условия, была приурочена к определенному сезону года. Сходная ситуация с ростом продуктивности конкретных таксонов рода *Aulacoseira* в определенные сезоны года наблюдается в современных водоемах. Так, многолетние исследования динамики численности популяций структурообразующих видов водорослей в озере оз. Красное, расположенном в центральной части Карельского перешейка, показали доминирование разных представителей *Aulacoseira* в альгологических сообществах различных сезонов с соответствующими температурами воды (Трифенова и др., 2008). Холодноводный вид *A. islandica* (O. Müll.) Sim. с температурным оптимумом от 5 до 10°C (Трифенова, 1990) является абсолютным доминантом (до 95%) весеннего и осеннего планктона оз. Красное. *A. subarctica* (O. Müll.) Haworth, обладающая более широкой экологической амплитудой, чем *A. islandica*, вегетирует в планктоне в течение всего периода открытой воды, но максимальной численности он достигает в июле-августе, иногда в сентябре. Наиболее теплолюбивый вид *A. granulata* (Ehr.) Sim.

также широко распространенный вид летне-осеннего планктона, его максимальная численность отмечается в июле-августе при температуре воды выше 20°C (Трифенова и др., 2008).

Установленное морфологическое разнообразие доминирующего рода, представляющее собой реакцию диатомей на сезонные изменения климата, могли быть обусловлены преобладанием в это время зимнего муссона над летним, что в свою очередь сказалось на характере обводненности территории. Сильнейшее влияние, несомненно, оказало формирование впадины Японского моря, в это время в нём начинает зарождаться система поверхностных холодных и теплых течений (Kawai, 1972), безусловно отразившаяся на климате континентальной окраины и Японии.

По данным Б.И. Павлюткина (2005), во флористическом комплексе начала среднего миоцена доминирует бук — *Fagus chankaica* T. Alexeenko, к субдоминантам относятся таксоидеи: *Metasequoia disticha* (Heer) Miki и *Taxodium dubium* (Sternb.) Heer., высока роль хвойных, среди

которых наибольшим таксономическим разнообразием отличаются представители родов *Pinus*, *Picea* и *Pseudotsuga*. Таксономический состав флоры позволяет отнести ее к типу листопадных теплоумеренных с участием элементов из более южных субтропических ареалов и сопоставить с современной растительностью Северного Хонсю (Япония).

Яркой особенностью спорово-пыльцевых комплексов является заметное преобладание сосновых и темнохвойных, а также постоянное высокое содержание пыльцы бука, что определяет теплоумеренный облик палинофлоры (Павлюткин, 2005). И по данным А.М. Короткого с соавторами (1996), в спорово-пыльцевых спектрах из отложений этого времени отмечается увеличение участия пыльцы термофильных широколиственных растений с элементами вечнозеленой субтропической растительности, в том числе пальм, что свидетельствует о потеплении, считающимся климатическим оптимумом позднего кайнозоя (рис. 4б). В конце же среднего миоцена по макрофлористическим данным роль бука и таксодиевых существенно снизилась, обычными становятся каштан, ильм, багряник, ольха, береза, бобовые, появляются *Liquidambar*, в настоящее время распространенный в теплом умеренном климате восточной части Северной Америки, и ива (Павлюткин и др., 2004).

Поздний миоцен. Анализ становления усть-суифунской диатомовой флоры позволил выделить два комплекса, сформировавшихся на разных этапах ее развития.

Для первого усть-суифунского комплекса (V этап), характерно увеличение общего видового разнообразия диатомей (58 таксонов) по сравнению со среднемиоценовыми комплексами (26–24 таксонов). На фоне обеднения на видовом уровне родов *Aulacoseira* и *Tetracyclus* (рис. 6, фиг. 5) значительно обогащается бентосная флора родов *Achnanthes*, *Diatoma*, *Encyonema*, *Eunotia*, *Fragilaria*, *Fragilarimorpha*, *Gomphonema*, *Tetracyclus* и *Pinnularia* (рис. 4а), среди которых доминируют представители рода *Achnanthes*, *Tetracyclus ellipticus* var. *ellipticus* (рис. 2; 4а). Высокие оценки обилия имеет планктонная *Aulacoseira italica* f. *italica* (Ehr.) Sim. — 19.2% (рис. 6, фиг. 1, 4, 6). Из других планктонных встречены представители родов *Actinocyclus* (*A. gorbunovii* Bradbury et Krebs (1.2%), *A. krasskei* Bradbury et Krebs (2.1%), *A. tunkaensis* Khurs. (0.4%)), *Mesodictyon* (*M. foveis* Theriot, Bradbury et Krebs (0.4%)), *Staurosira* (*S. construens* var. *venter* (Ehr.) Grun. (3.2%) (рис. 6, фиг. 1–3), *Melosira* (*M. undulata* (Ehr.) Kütz. (рис. 6, фиг. 7), появляется род *Pseudoaulacosira* (*P. moisseviae* (Lupik.) Lupik. et Khurs. (0.1%)). Этот комплекс содержит stenothermные субтропическо-тропические

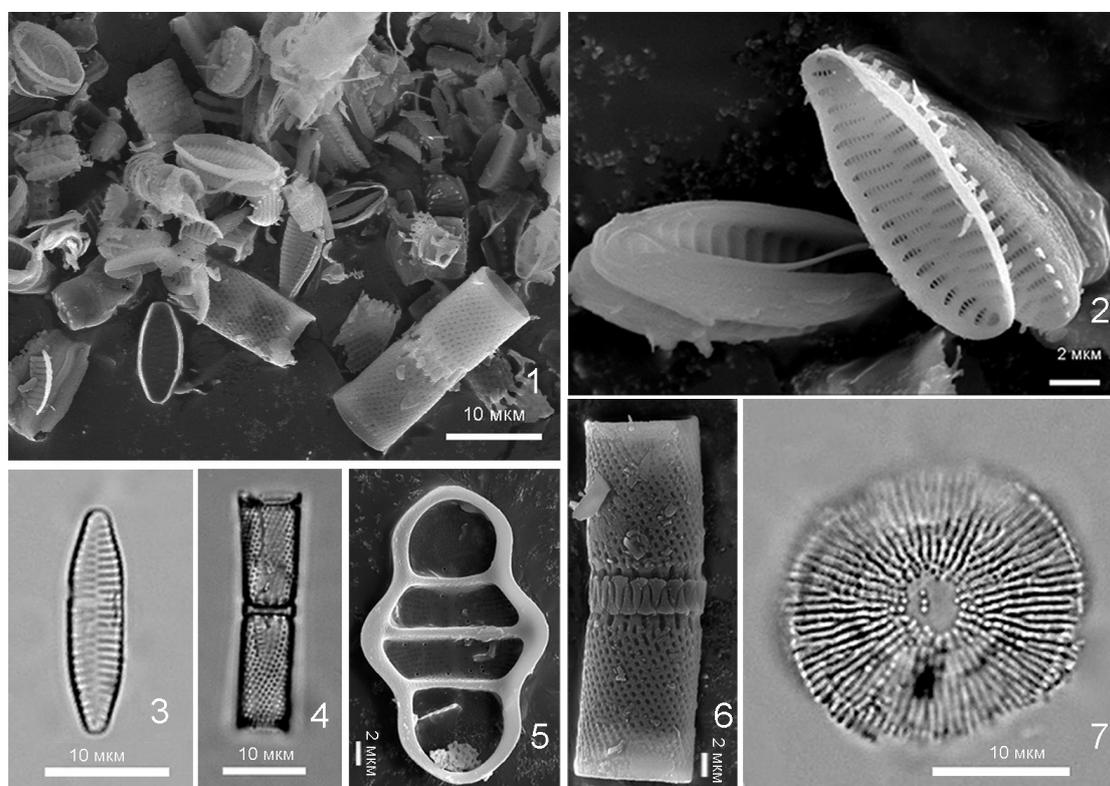


Рис. 6. Диатомей первого и второго усть-суифунских комплексов (поздний миоцен): 1 — общий вид диатомита, 2, 3 — *Staurosira construens* var. *venter* (Ehr.) Grun., 4, 6 — *Aulacoseira italica* f. *italica* (Ehr.) Sim., 5 — *Tetracyclus glans* (Ehr.) Mills, 7 — *Melosira undulata* (Ehr.) Kütz. Фото 1, 2, 5, 6 — СЭМ; 3, 4, 7 — СМ.

виды *Actinella brasiliensis* и *Sellaphora americana*. В палеосообществах отмечается большое количество диатомей, характерных только для отложений верхнего миоцена и плиоцена Приморья (Моисеева, 1995). Это *Mesodictyon fovis*, *Discostella pliostelligera* (Tanaka et Nagumo) Houk et Klee, *Pseudoaulacosira moisseeviae*. Важной представляется и находка *Fragilaria triangulata* Moiss., появление которой отмечается в позднем миоцене (Моисеева, 1995). Необходимо отметить, что в этом комплексе впервые обнаружены створки *Mesodictyopsis miyatanus* Tanaka, маркирующего отложения верхнего миоцена Японии (Tanaka, Nagumo, 2009). Виды этого рода, кроме Японии, ранее были известны только из верхнемиоценовых отложений оз. Байкал (Khursevich et al., 2004). Общий фон диатомовой флоры составляют представители родов *Achnanthes*, *Aulacoseira*, *Eunotia*, *Fragilaria*, *Pinnularia* и *Tetracyclus*.

Во втором усть-суйфунском комплексе (VI этап) встречаются бентосные виды родов *Achnanthes* (до 12.2%), *Pinnularia* (до 7.2%), *Staurosira* (до 4.8%) и *Tetracyclus* (до 39.5%) и планктонные *Aulacoseira italica* var. *italica* (до 7.4%) (рис. 6, фиг. 1, 4, 6), *A. praegratulata* var. *praegratulata* f. *praegratulata* — до 5.3%, *A. praegratulata* var. *praeislandica* f. *praeislandica* (0.3%) (рис. 2), также выявлены и диагностические для усть-суйфунской свиты виды: *Mesodictyon fovis* — 0.7%, *M. miyatanus* — 0.2%, *Cyclotella pliostelligera* — 0.8%, *Pseudoaulacosira moisseeviae* — 0.5%, *Actinocyclus gorbunovii* — 1.1%, *A. krasskei* — 1.3%, *A. tunkaensis* — 0.5%, *Eunotia majuscula* — 1.7%, *E. miocenica* — 2.9%, *Fragilaria miocenica* var. *miocenica* — 1.3%, *F. miocenica* var. *tetranodis* — 1.6%, *F. triangulata* — 0.5%, *Gomphocymbella miocenica* — 3.9%. Этот комплекс отличается от комплекса первой половины позднего миоцена высокой ролью видов северо-бореальной природы (68.5%), среди которых наиболее часто встречается *Pinnularia borealis* (7.2%), при этом сокращается численность планктонного компонента, на смену которому приходят бентосные виды (до 78.0 %) (рис. 4а).

Возрастной диапазон формирования представленных комплексов соответствует первой фазе похолодания (рис. 4б), установленной А.М. Коротким с соавторами (1996). К этому времени уже была сформирована Сихотэ-Алинская горная система с трансформацией грабенной западной части в мульдообразные впадины и развитием речной сети высоких порядков (Баскакова, 2006; Павлюткин, Петренко, 2010). Изменение экологической структуры палеосообществ диатомей свидетельствует о смене фациальных обстановок и отражают направленную тенденцию на похолодание климата. Первый усть-суйфунский комплекс формировался в

условиях относительно теплоумеренного климата и соответствует русловой обстановке. В нем встречены теплолюбивые *Actinella brasiliensis* и *Sellaphora americana*, отсутствующие во втором комплексе. Хотя необходимо отметить, что второй комплекс, фиксирующий волну относительного похолодания конца позднего миоцена, судя по концентрации створок в осадках, образовался в условиях более благоприятных для развития северо-бореальных диатомей, а также сохранности их створок в осадках, скорее всего, в мелководном озере, старице.

Макрофлористические данные, полученные по результатам изучения отложений Пушкинской депрессии, также отражают два этапа формирования растительности в позднем миоцене (Павлюткин, Петренко, 2010). Основная особенность первого из них состоит в обилии и таксономическом разнообразии ореховых: *Pterocarya*, *Cyclocarya*, *Carya* при полном отсутствии буковых и незначительном участии хвойных. Цветковые растения представлены преимущественно умеренными родами. Кроме того, довольно многочисленны отпечатки *Liquidambar* (Павлюткин, 2001; Павлюткин, Петренко, 2010). Второй фитокомплекс заметно отличается от других известных усть-суйфунских флор обилием отпечатков листьев *Fagus palaeograndifolia* Pavlyutkin. В позднемиоценовых флорах Японии бук является характерным элементом и служит важным климатическим индикатором (Uemura, 1998). По-видимому, второй фитокомплекс соответствует самому позднему этапу в развитии флор, характеризующих усть-суйфунскую свиту.

Палинологические спектры, выделенные Т.И. Петренко из усть-суйфунских отложений (Павлюткин, Петренко, 2010), однотипны по таксономическому составу и частоте встречаемости таксонов, что позволяет их рассматривать как единый стратиграфический палинокомплекс. В составе покрытосеменных встречены *Betula* spp. (12%), *Alnus* (2.8–7.9%), *Carpinus* (10.9%), ореховые — *Juglans* (3.9–7.6%), *Carya* (0.8–3.3%), ильмовые — *Ulmus* (1.7–9.2%). Содержание пыльцы бука обычно меняется в пределах 1–3%. По мнению Т.И. Петренко (Павлюткин, Петренко, 2010), данные палиноспектры весьма близки к новокачалинским палинокомплексам, но отличаются незначительным участием в них пыльцы *Pinus* и *Fagus*. Установленные различия макрофлористических и палинологических данных, возможно, обусловлены проявлением региональных особенностей при формировании листовой флоры района исследований.

В целом же растительность Приморья в это время имела не только четко выраженную поясность: равнины занимали широколиственные леса, а горное обрамление — леса, основу кото-

рых составляли ель, пихта, тсуга (Короткий, Демидова, 1977), но и различия по широте. Так, спорово-пыльцевые спектры из отложений побережья у м. Поворотного (Юго-Восточное Приморье) отражают хвойно-широколиственные леса с участием бука, орехов, ильмов, лип, кленов, среди хвойных — пихт, тсуг, сосен (Короткий и др., 1996; Короткий, Демидова, 1977).

Вторая фаза похолодания (6–8 млн лет), установленная А.М. Коротким с соавторами (1996) в конце позднего миоцена, в Пушкинской впадине не зафиксирована. Спорово-пыльцевые и диатомовые комплексы из кировской толщи, соответствующей этому возрасту, изучены намного севернее, во впадине Кунго, Средний Сихотэ-Алинь (Олейников, Олейников, 2005; Пушкарь и др., 1981).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что относительно термофильный облик диатомовой флоры, сохранявшийся на протяжении раннего-среднего миоцена, постепенно изменился — значительно сократилось участие планктонных таксонов рода *Aulacoseira* группы «ргае» и увеличилось участие бентосных таксонов. Эволюция диатомовой флоры в основном определялась изменением климата, в частности его прогрессивным похолоданием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальные исследования диатомовой флоры из миоценовых отложений Южного Приморья позволили выделить шесть комплексов диатомей, соответствующих шести этапам развития диатомовой флоры региона, которые определялись не только общими эволюционными взаимоотношениями между организмами, но и изменениями климата, и геологическими событиями, происходившими в миоцене.

Дополнительным подтверждением реконструированных нами трендов изменения диатомовых палеосообществ послужили результаты изучения листовой флоры, спор и пыльцы, а также сопоставление с уже имеющейся палеоклиматической кривой (Короткий и др., 1996).

Для раннего миоцена были характерны благоприятные условия для развития тепловодной флоры диатомей с участием субтропических видов (*Actinella brasiliensis*, *A. punctata*, *Symbella australica*, *Desmogonium guianense*, *D. rabenhorstianum*, *Sellaphora americana*). Комфортная среда обитания была обусловлена наступившим после позднеолигоценового похолодания потеплением. Наиболее теплые условия были зафиксированы в начале среднего миоцена, соответствующего времени миоценового климатического оптимума. Во второй половине

среднего миоцена проявляется направленное похолодание, реакцией диатомовой флоры на которое было высоко участие бореальных элементов, исчезновение из состава палеосообществ теплолюбивых диатомей. Лишь в начале позднего миоцена участие в палеосообществах субтропическо-тропических видов (*Actinella brasiliensis* и *Sellaphora americana*) отражают условия некоторого потепления, но их довольно быстрое исчезновение и активное развитие северо-бореальных диатомей фиксируют наступающее похолодание.

Переход от климатического оптимума к прогрессирующему похолоданию в миоцене с незначительными флуктуациями климата способствовал вымиранию многих видов и формированию современного облика диатомовой флоры.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-31195.

Список литературы

- Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 2006. 498 с.
- Баскакова Л.А. Событийность и этапность геологического развития в кайнозойе материковой части Востока России // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25. № 3. С. 3–18.
- Буртман В.С. Геодинамика Тибета, Тарима и Тянь-Шаня в позднем кайнозойе // Геотектоника. 2012. № 3. С. 18–46.
- Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли — индикаторы экологических условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. / Отв. ред. Прошкина-Лавренко А.И. Л.: Наука, 1974. 403 с.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. II. Вып. 2. / Под ред. Глезер З.И., Макаровой И.В., Моисеевой А.И., Николаева В.А. СПб.: Наука, 1992. 125 с.
- Диатомовые водоросли России и сопредельных стран. Т. II. Вып. 5. / Под ред. Стрельниковой Н.И., Цой И.Б. СПб: Изд-во С-Петерб. ун-та, 2008. 171 с.
- Короткий А.М., Гребенникова Т.А., Пушкарь В.С. и др. Климатические смены на территории юга Дальнего Востока в позднем кайнозойе (миоцен-плейстоцен) / Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1996. 56 с.
- Короткий А.М., Демидова Т.И. О возрасте подбазальтовых отложений мыса Поворотного (Юго-Восточное Приморье) // Стратиграфия кайнозойских отложений. Владивосток. 1977. С. 81–87.

- Кузьмин М.И., Хурсевич Г.К., Прокопенко А.А. и др.* Центрические диатомовые водоросли позднего кайнозоя озера Байкал: морфология, систематика, стратиграфическое распространение, этапность развития (по материалам глубоководного бурения). Новосибирск: Гео, 2009. 374 с.
- Моисеева А.И.* Расчленение континентальных отложений неогена Дальнего Востока по диатомеям // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1995. Т. 3. № 5. С. 92–103.
- Лихачева О.Ю.* Основные геобиологические события неогена юга Приморья (диатомовый анализ): Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 2013. 25 с.
- Лихачева О.Ю., Пушкарь В.С., Черепанова М.В., Павлюткин Б.И.* Зональная диатомовая шкала и основные геобиологические события неогена Приморья // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 64–72.
- Олейников А.В., Олейников Н.А.* Геология кайнозоя Среднего Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 2005. 261 с.
- Павлюткин Б.И.* Позднемиоценовая флора Тереховки, Южное Приморье. Владивосток: Дальнаука, 2001. 128 с.
- Павлюткин Б.И.* Среднемиоценовая ханкайская флора Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2005. 216 с.
- Павлюткин Б.И.* Геология и условия формирования кайнозойских отложений континентального юга Дальнего Востока: Автореф. докт. дисс. геол.-мин. наук. Владивосток, 2008. 48 с.
- Павлюткин Б.И., Ганзей С.С., Пушкарь В.С., Петренко Т.И.* Палеоботаническая характеристика и радиометрическое датирование неогеновых отложений Южного Приморья // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1993. Т. 1. № 6. С. 40–47.
- Павлюткин Б.И., Голозубов В.В.* Палеоботанические свидетельства времени возникновения Японского моря // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. 16. С. 19–26.
- Павлюткин Б.И., Климова Р.С., Царько Е.И.* Новые данные по фито-стратиграфии и палеогеографии позднего миоцена Юго-Западного Приморья // Советская Геология. 1985. № 2. С. 47–55.
- Павлюткин Б.И., Петренко Т.И., Царько Е.И.* Третичная сандуганская свита Приморья: проблемы возраста и корреляции // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 5. С. 69–81.
- Павлюткин Б.И., Петренко Т.И.* Стратиграфия палеоген-неогеновых отложений Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2010. 164 с.
- Павлюткин Б.И., Пушкарь В.С., Черепанова М.В., Петренко Т.И.* Проблемы стратиграфии миоцена Приханкайской впадины (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 4. С. 73–85.
- Попов В.К., Рассказов С.В., Чекрыжов И.Ю. и др.* Калий-аргоновые датировки и геохимические характеристики кайнозойских трахибазальтов и трахиандезитов Приморья // Тр. научной школы «Щелочной магматизм Земли». М. 2005. С. 133–135.
- Пушкарь В.С., Лихачева О.Г., Высочина О.В., Петренко Т.И.* Диатомовые комплексы позднего кайнозоя северной и средней части Сихотэ-Алиня // Развитие природной среды в плейстоцене (юг Дальнего Востока). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 51–56.
- Стратиграфический кодекс России / Под ред. Жамойда А.И. Издание третье. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. 96 с.
- Трифонова И.С.* Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука, 1990. 184 с.
- Трифонова И.С., Афанасьева А.Л., Бульон В.В. и др.* Многолетние изменения биологических сообществ мезотрофного озера в условиях климатических флуктуаций и эвтрофирования. СПб: Лема, 2008. 246 с.
- Чекрыжов И.Ю.* Роль вулканизма в процессах седиментации и угленакопления в кайнозойских впадинах Западного Приморья // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканизму и палеовулканизму «Вулканизм и геодинамика». Петропавловск-Камчатский: ИвиС ДВО РАН, 2009. Т. 2. С. 832–833.
- Kawai H.* Hydrography of the Kuroshio extension // Kuroshio — Its Physical Aspects / Eds. Stommel H. and Yoshida K. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972. P. 235–352.
- Khursevich G.K., Kociolek J.P., Iwashita T. et al.* Mesodictyopsis Khursevich, Iwashita, Kociolek et Fedenya — a new genus of diatoms in the class Coscinodiscophyceae (Bacillariophyta) from Upper Miocene sediments of Lake Baikal, Siberia // Proceedings of the California Academy of Sciences. Series 4. 2004. V. 55. № 15. P. 338–357.
- Rowley D.B.* Age of initiation of collision between India and Asia: a review of stratigraphic data // Earth Planetary Science Letters. 1996. V. 145. P. 1–13.
- Tanaka H., Nagumo T.* Two new Mesodictyopsis species, *M. akitaensis* sp. nov. and *M. miyatanus* sp. nov., from a Late Miocene to Pliocene freshwater sediment, Japan // Acta Botanica Croatica. 2009. V. 68. № 2. P. 221–230.
- Uemura K.* Oligocene Plant from Akodi in the Northeastern Sasebo coal-bearing field, Kyushu, Japan // Memoirs of the National Science Museum, Tokyo. 1998. V. 31. P. 57–65.

Usoltseva M.V., Tsoy I.B. Elliptical species of the freshwater genus *Aulacoseira* in Miocene sediments from Yamato Rise (Sea of Japan) // *Diatom Research*. 2010. V. 25. № 2. P. 397–415.

Williams D.M. Fossil species of the diatom genus *Tetracyclus* (Bacillariophyta, «ellipticus» species group): morphology, interrelationships and

the relevance of ontogeny // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1996. V. 351. P. 1759–1782.

Zachos J., Pagani M., Sloan L. et al. Rhythms, and aberrations in Global Climate 65 Ma to Present // *Science*. 2001. V. 292. I. 5517. P. 686–693.

PERIODS IN THE DEVELOPMENT OF SOUTH PRIMORYE DIATOM FLORA IN MIOCENE AND RELATIONSHIP BETWEEN THEM AND CLIMATE CHANGES AND GEOLOGICAL EVENTS

O.Yu. Likhacheva¹, A.S. Avramenko^{2,3}

¹*Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, 690022;*
²*Institute of Biology and Soil Science FEB RAS, Vladivostok, 690022;*
³*Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690922*

This article presents study of diatoms from Miocene deposits of South Primorye. Changes in quantity of the diatom valves in the deposits, taxonomic composition and ecological structure allowed revealing six periods in the development of the South Primorye diatom flora. They are caused by fluctuations of climate and regional tectonic factors. Life conditions of the diatom in Miocene have been reconstructed.

Keywords: diatom algae, Miocene, paleoclimate, South Primorye.