

УДК: [551.583.7:551.781.41+561:581.33](571+510)

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ КЛИМАТА ВОСТОКА АЗИИ В РАННЕМ ЭОЦЕНЕ

**Бондаренко О. В.¹, Евстигнеева Т. А.¹, Жмеренецкий А. А.¹,
Аллагуватова Р. З.¹, Утешер Т.^{2,3}**

¹ФГБУН Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
г. Владивосток

²Senckenberg Research Institute and Natural History Museum, Frankfurt-on-Main, Germany,

³Institute for Geosciences, University of Bonn, Bonn, Germany

E-mail: laricioxylon@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7218-7586>

С использованием метода сосуществования выделены климатические зоны для раннего эоцена востока Азии. Данные для реконструкции включают 48 палинофлор из континентальных отложений нижнего эоцена востока Азии между 75° и 19° с. ш. Полученные климатические выводы согласуются с глобальными трендами, демонстрируя высокие средние значения среднегодовой температуры и среднегодового количества осадков. По нашим результатам наблюдается слабо выраженный широтный градиент температуры в направлении с севера на юг, демонстрирующий тренд на увеличение средних значений, тогда как очень слабо выраженный широтный градиент осадков показывает тренд на их уменьшение. На основе средних значений температуры и осадков выделяются три региональных климатических зоны. Зона теплого умеренного климата (севернее $\approx 55^\circ$ палеошироты) характеризуется низкими значениями для температуры (14.2–16.2 °C) и высокими для осадков (1158–1334 мм). В переходной зоне (≈ 45 – 55° палеошироты) среднегодовые температуры варьируют от 15.9 до 19.0 °C, а среднегодовые осадки – от 874 до 1352 мм. Зона субтропического климата (южнее $\approx 45^\circ$ палеошироты) характеризуется высокими значениями для температуры (16.5–19.1 °C) и низкими для осадков (874–1263 мм).

Ключевые слова: количественная реконструкция, среднегодовая температура, среднегодовое количество осадков, широтный градиент, климатические зоны.

DOI: 10.34078/1814-0998-2024-1-14-25

ВВЕДЕНИЕ

Азия является самым большим и неоднородным по рельефу континентом планеты. Из-за значительных размеров и протяженности с севера на юг в настоящее время на этой территории представлены почти все типы климата – от арктического до экваториального. Наблюдаемые в настоящее время климатические градиенты во многом являются результатом преобладающих глобальных и региональных моделей циркуляции атмосферы и океанов и их изменчивости. Кроме того, перенос энергии океаном и атмосферой на север является причиной асимметричного распределения типов климата. Таким образом, региональные данные дадут обширный материал к познанию эволюции климатов Земли в геологическом

прошлом и разработке общей теории климата планеты как базы для прогнозирования его изменений в ближайшем и отдаленном будущем.

Глобально эоценовый климат был очень теплым и влажным, со слабо выраженным широтным градиентом температур от полюса к экватору, и перемежался кратковременными гипертермальными фазами (Westerhold et al., 2020), т. е. характеризовался климатическими условиями, в значительной степени отличными от современных. Однако именно в это время возникли континентальные конфигурации, биотические сообщества и биогеохимические режимы, близкие к современным. Понимание функции этих систем в глобальных парниковых условиях интересно как с точки зрения прошлого, так и будущего. Поэтому исследования по изучению климата активно ведутся по всему миру на разном материале и разными методами. Континентальный эоценовый климат хорошо изучен в Ев-

ропе и Северной Америке. В Восточной Азии палеоклиматические данные были получены только для отдельных геологических интервалов. Обобщающих региональных работ по палеоклиматам Дальнего Востока России (ДВР) и Восточной Сибири до сих пор не существует. Конечно, наряду с многочисленными таксономическими исследованиями, в литературе часто встречаются отдельные замечания о климатических условиях ДВР и Восточной Сибири в прошлом (Лаухин и др., 1992; Фрадкина, 1995; Кодрул, 1999), но чаще всего это только качественные оценки, указывающие лишь на общий характер климата. Таким образом, эти исследования дают лишь некоторое представление о региональном климате и его эволюции, т. к. оперируют качественными характеристиками и сосредоточены на местных условиях. Количественные данные для ДВР и Восточной Сибири до сих пор практически отсутствуют. Только на примере некоторых флор были получены количественные характеристики и проводились исследования некоторых аспектов изменения климата ДВР в палеогене на основе палеоботанических данных с использованием современных количественных методов (Буданцев, 1997, 1999; Utescher et al., 2015; Moiseeva et al., 2018; Bondarenko et al., 2020a, b, 2022; Bondarenko, Utescher, 2023b). Недавно были реконструированы градиенты температуры (Bondarenko, Utescher, 2022) и осадков (Bondarenko, Utescher, 2023a) для раннего палеогена востока Азии. Однако наши знания об эволюции климата востока Азии в палеогене вообще и в раннем эоцене в частности всё ещё бедны и фрагментарны.

Цель данного исследования – выделить климатические зоны для раннего эоцена востока Азии на основе средних значений среднегодовых температуры и количества осадков.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили 48 палинофлор из континентальных отложений нижнего эоцена востока Азии между 75° и 19° с. ш. (рис. 1). Список местонахождений и ссылки на источник материала для каждого местонахождения приведены в таблице. Возраст вмещающих отложений принят в соответствии с комплексными региональными стратиграфическими схемами Северо-Востока России (Гриненко и др., 1997), Приамурья (Кезина, 2005), Сахалина (Гладенков и др., 2002), Приморья (Павлюткин, Петренко, 2010) и Китая (Quan et al., 2012a, b).

Для реконструкции климата применяется метод сосуществования (Mosbrugger, Utescher, 1997). Он основан на экстраполяции эколого-климатических условий произрастания современных растений на ископаемые (принцип ак-

туализма). Каждое современное растение произрастает в определенных климатических условиях, где каждый параметр климата характеризуется минимальным и максимальным значениями, т. е. его определенным диапазоном. Конкретная флора состоит из набора таксонов с соответствующими им диапазонами климатических параметров. Выявление количественных показателей климата проводится на основе выделения диапазонов, при которых могло встречаться наибольшее количество таксонов конкретной анализируемой палеофлоры. Полученный диапазон, установленный для данной климатической переменной, обозначается как интервал сосуществования (рис. 2). В результате для палеофлоры определяется минимальное и максимальное значения, а также рассчитывается среднее значение реконструируемого климатического параметра. Результаты считаются достоверными при условии, что в выборке будет не менее 10 таксонов близкородственных современных аналогов ископаемых растений, имеющих количественные показатели для данного климатического параметра. Точность результатов также зависит от ранга анализируемых таксонов. В настоящем исследовании для близкородственных современных аналогов ископаемых растений были использованы таксоны ранга родов или семейств. Космополитные, монотипные и эндемичные таксоны, а также таксоны, для которых недостаточно информации, были исключены из анализа. *Larix* Mill. и *Picea* A. Dietr., как индикаторы высотной зональности, были исключены из расчетов (Bondarenko et al., 2020a; Bondarenko, Utescher, 2022). В данном исследовании реконструируются два климатических параметра: среднегодовая температура и среднегодовое количество осадков. В качестве источника климатических требований для близкородственных современных аналогов ископаемых растений использовались данные из базы Palaeoflora (Utescher, Mosbrugger, 2018). Пространственное распределение средних значений двух реконструируемых климатических параметров показано на палеогеографических картах. Для технической подготовки карт использовались Сервис реконструкции тектонических плит ODSN для возраста 55 млн лет и программа ArcMAP 10.4.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе анализа 48 палинофлор получены количественные показатели среднегодовой температуры и среднегодового количества осадков. Количество ископаемых таксонов в исследованных флорах изменяется от 11 до 97. Количество таксонов близкородственных современных аналогов ископаемых растений во флорах, включенных в анализ, варьирует от 14 до 82 (в среднем 37.4), за исключением одной флоры (34 Shache,

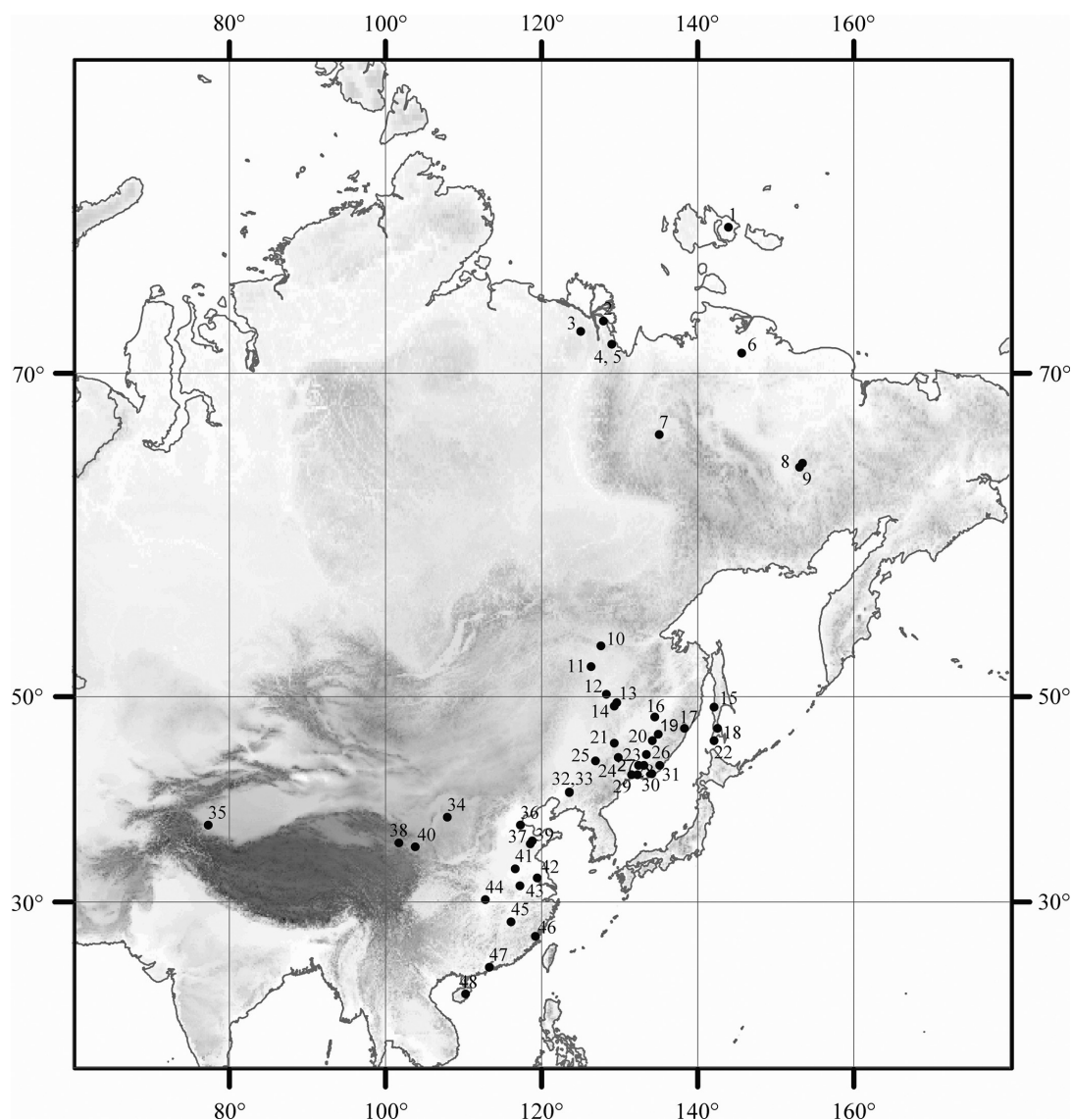


Рис. 1. Карта, показывающая расположение местонахождений раннеэоценовых палинофлор востока Азии.

1 – Новосибирские острова, 2 – Быковская протока, 3 – Кенгдей, 4, 5 – Кунга, 6 – озеро Тастах, 7 – Диринг-Юрюе-15, 8 – Шаманиха, 9 – Медвежьи озера, 10 – Снежнегорское, 11 – Ушумунский-5, 12 – Ерквцы-154, 13 – Райчихинск, 14 – Свободное-53, 15 – Снежинка, 16 – Бирофельд, 17 – озеро Тони, 18 – Красноярка, 19 – Алчан, 20 – Бикин, 21 – Лучегорск-540/541, 22 – Крильон, 23 – Yilan, 24 – Крыловский-524, 25 – Hualin, 26 – Shulan, 27 – Реттиховка, 28 – Арсеньевка, 29 – Тавричанка-9142, 30 – Смоляниново, 31 – ключ Угольный, 32, 33 – Fushun, 34 – Etuoke, 35 – Shache, 36 – Huanghua, 37 – Changle, 38 – Xining, 39 – Wutu, 40 – Lanzhou, 41 – Luanchuan, 42 – Gaoyou, 43 – Hefei, 44 – Jianghau, 45 – Qingjiang, 46 – Donghai, 47 – Zhujiang, 48 – Changchang.

Fig. 1. Map showing locations of the early Eocene palynofloras of the East Asia.

1 – Novosibirsk Islands, 2 – Bykovskaya Branch, 3 – Kengdey, 4, 5 – Kunga, 6 – Lake Tastakh, 7 – Diring-Yurye-15, 8 – Shamanikha, 9 – Bear Lakes, 10 – Snezhnegorskoye, 11 – Ushumunsky-5, 12 – Yerkovtsy-154, 13 – Raychikhinsk, 14 – Svobodnoye-53, 15 – Snezhinka, 16 – Birofeld, 17 – Lake Toni, 18 – Krasnoyarka, 19 – Alchan, 20 – Bikin, 21 – Luchegorsk-540/541, 22 – Krillon, 23 – Yilan, 24 – Krylovsky-524, 25 – Hualin, 26 – Shulan, 27 – Rettikhovka, 28 – Arsenyevka, 29 – Tavrichanka-9142, 30 – Smolyaninovo, 31 – Ugolny Creek, 32, 33 – Fushun, 34 – Etuoke, 35 – Shache, 36 – Huanghua, 37 – Changle, 38 – Xining, 39 – Wutu, 40 – Lanzhou, 41 – Luanchuan, 42 – Gaoyou, 43 – Hefei, 44 – Jianghau, 45 – Qingjiang, 46 – Donghai, 47 – Zhujiang, 48 – Changchang.

рис. 1), включающей всего 9 таксонов. В 38 из 48 исследованных флор все близкородственные современные аналоги ископаемых растений могут сосуществовать, во всех остальных флорах – более 98 %. Такая высокая доля сосуществующих таксонов (в среднем 99.7 %) указывает на высо-

кий уровень значимости результатов. Высокая степень совпадения также свидетельствует о целостности нашей концепции, в которой для близкородственных современных аналогов ископаемых растений были использованы таксоны ранга родов или семейств. Это необходимо для ранне-

Таблица. Раннеэоценовые местонахождения востока Азии

Table. Early Eocene sites of East Asia

№	Местонахождение	Координаты		Свита/толща/группа (слой)	Ссылка
		с. ш.	в. д.		
1	Новосибирские о-ва	75° 53'	143° 91'	Анжуйская	Гриненко и др. (1989)
2	Быковская протока	72° 20'	127° 90'	Кенгдейская	Гриненко и др. (1989)
3	Кенгдей	71° 79'	124° 98'	Кенгдейская	Гриненко и др. (1989)
4	Кунга	71° 28'	128° 99'	Эмгенденская	Гриненко и др. (1989)
5	Кунга	71° 28'	128° 99'	Кенгдейская	Гриненко и др. (1989)
6	озеро Тастах	70° 90'	145° 60'	Тастахская	Кулькова (1973)
7	Диринг-Юрюе-15	67° 18'	135° 07'	Диринская (инт. 383–418 м)	Гриненко и др. (1989)
8	Шаманиха	65° 70'	153° 40'	Шаманиховская (верхняя)	Гриненко и др. (1989)
9	Медвежьё озера	65° 50'	153° 00'	Копачская	Гриненко и др. (1989)
10	Снежнегорское	54° 10'	127° 60'	Райчихинская	Кезина и Олькин (2000)
11	Ушумунский-5	52° 50'	126° 30'	Райчихинская	Варнавский и др. (1988)
12	Ерковцы-154	50° 36'	128° 30'	Райчихинская	Кезина (2005)
13	Райчихинск	49° 50'	129° 20'	Райчихинская	Кезина (2005)
14	Свободное-53	49° 30'	129° 30'	Райчихинская	Кезина (2005)
15	Снежинка	49° 20'	142° 15'	Снежинкинская (верхняя)	Кодрул (1999)
16	Бирофельд	48° 20'	132° 50'	Чернореченская (нижняя)	Зива и Лукашова (1977)
17	озеро Тони	47° 40'	138° 30'	Кизинская	Варнавский и др. (1988)
18	Красноярка	47° 40'	142° 50'	Найбутинская (верхняя)	Кодрул (1999)
19	Алчан	46° 87'	134° 94'	Угловская	Павлюткин и Петренко (2010)
20	Бикин	46° 57'	135° 09'	Нижняя угольная	Павлюткин и Петренко (2010)
21	Лучегоorsk-540/541	46° 30'	134° 20'	без названия	Павлюткин и Петренко (2010)
22	Крильон	46° 30'	142° 10'	Снежинкинская (верхняя)	Фотьянова и др. (2001)
23	Yilan	46° 10'	129° 30'	Xin'ancun	Quan et al. (2012a, b)
24	Крыловский-524	45° 10'	133° 40'	Угловская	Павлюткин и Петренко (2010)
25	Hualin	44° 80'	129° 80'	Bahuli	Quan et al. (2012a, b)
26	Shulan	44° 50'	126° 90'	Bangchuigou	Quan et al. (2012a)
27	Реттиховка	44° 10'	132° 40'	аналог Угловской	Павлюткин и Петренко (2010)
28	Арсеньевка	44° 10'	133° 10'	аналог Угловской	Болотникова (1988)
29	Тавричанка-9142	43° 30'	131° 50'	аналог Угловской	Павлюткин и Петренко (2010)
30	Смоляниново	43° 20'	132° 30'	Угловская	Павлюткин и Петренко (2010)
31	ключ Угольный	43° 20'	134° 10'	Угловская	Павлюткин и Петренко (2010)
32	Fushun	41° 80'	123° 90'	Guchengzi	Quan et al. (2012a)
33	Fushun	41° 50'	123° 54'	Guchengzi	Wang et al. (2010)
34	Etuo	39° 10'	107° 90'	Unnamed unite 1 (lower)	Quan et al. (2012a)
35	Shache	38° 30'	77° 30'	Kalataer	Quan et al. (2012a)
36	Huanghua	38° 30'	117° 30'	Shahejie (part IV)	Quan et al. (2012a)
37	Changle	36° 70'	118° 80'	Wutu	Quan et al. (2012a)
38	Xining	36° 50'	101° 70'	Qijiachuan (parts III, IV)	Quan et al. (2012a)
39	Wutu	36° 39'	118° 55'	Wutu	Quan et al. (2012a)
40	Lanzhou	36° 10'	103° 80'	Unnamed unite 2 (lower)	Quan et al. (2012a)
41	Luanchuan	33° 80'	116° 60'	Tantou (lower)	Quan et al. (2012a)
42	Gaoyou	32° 80'	119° 40'	Dianan	Quan et al. (2012a)
43	Hefei	31° 86'	117° 28'	Dingyuan (part III)	Quan et al. (2012a)
44	Jianghu	30° 40'	112° 80'	Xingouzui	Quan et al. (2012a)
45	Qingjiang	27° 90'	116° 10'	Qingjiang (part I)	Quan et al. (2012a)
46	Donghai	26° 40'	121° 70'	Oujiang	Quan et al. (2012a)
47	Zhujiang	22° 60'	113° 30'	Lufeng	Quan et al. (2012a)
48	Changchang	19° 38'	110° 27'	Changchang	Yao et al. (2009)

Приведенные в таблице местонахождения показаны на рис. 1.

го эоцена, но неизбежно приводит к расширению реконструируемых интервалов сосуществования и снижению точности полученных значений. Для среднегодовой температуры средняя ширина интервала сосуществования для всех проанализированных флор составляет 5.3 °C (стандартное отклонение 3.0 °C). Для среднегодовых осадков средняя ширина такого интервала составляет 420 мм (стандартное отклонение 224 мм). Более высокие средние значения могут быть связаны с тем, что идентификация на уровне рода или вида

невозможна. В свою очередь, более широкие климатические диапазоны для родов и семейств смещают средние значения интервалов в сторону более высоких значений.

Полученные интервалы сосуществования, а также средние значения среднегодовой температуры и среднегодового количества осадков для каждой флоры показаны на рисунке 3. В результате нами реконструируются высокие средние значения среднегодовой температуры (от 14.2 до 19.1 °C) и среднегодового количества осад-

Местонахождение: Lanzhou

Свита: Unamed unit 2 (lower)

Возраст: ранний эоцен

Метод датирования: литология, палеоботаника, палеомагнитные исследования

Регион: провинция Gansu, Китай

Широта: 36°10'

Долгота: 103°80'

Тип флоры: палинофлора

Ссылка: Quan et al. (2012a)

Ископаемый таксон Близкородственный
современный аналог

<i>Alsophilidites</i> sp.	unknown
<i>Betulaceipollenites</i> sp.	Betulaceae Gray
<i>Celtispollenites</i> sp.	<i>Celtis</i> L.
<i>Chenopodipollis</i> sp.	Chenopodioideae Burnett
<i>Euphorbiacites</i> sp.	Euphorbiaceae Juss.
<i>Fraxinopollenites</i> sp.	<i>Fraxinus</i> L.
<i>Ginkgo</i> sp.	<i>Ginkgo</i> L.
<i>Graminidites</i> sp.	Poaceae Barnh.
<i>Ilexpollenites</i> sp.	<i>Ilex</i> L.
<i>Inaperturopollenites</i> sp.	Cupressaceae Gray
<i>Juglanspollenites</i> sp.	<i>Juglans</i> L.
<i>Laricoidites</i> sp.	<i>Larix</i> Mill.
<i>Liquidambarpollenites</i> sp.	<i>Liquidambar</i> L.
<i>Lycopodiumsporites</i> sp.	<i>Lycopodium</i> L.
<i>Lygodioisporites</i> sp.	<i>Lygodium</i> Swartz
<i>Meliaceoidites</i> sp.	Meliaceae Juss.
<i>Multicellaesporites</i> sp.	unknown
<i>Osmundacidites</i> sp.	<i>Osmunda</i> L.
<i>Pinuspollenites</i> sp.	<i>Pinus</i> L.
<i>Polypodiaceasporites</i> sp.	Polypodiaceae Bercht. et J.Presl
<i>Polypodiisporites</i> sp.	Polypodiaceae Bercht. et J.Presl
<i>Quercoidites</i> sp.	<i>Quercus</i> L.
<i>Salixipollenites</i> sp.	<i>Salix</i> L.
<i>Taxodiaceapollenites</i> sp.	Taxodioideae Endl. ex K.Koch
<i>Tetradomonopores</i> sp.	<i>Typha</i> L.
<i>Tricolporopollenites</i> sp.	unknown

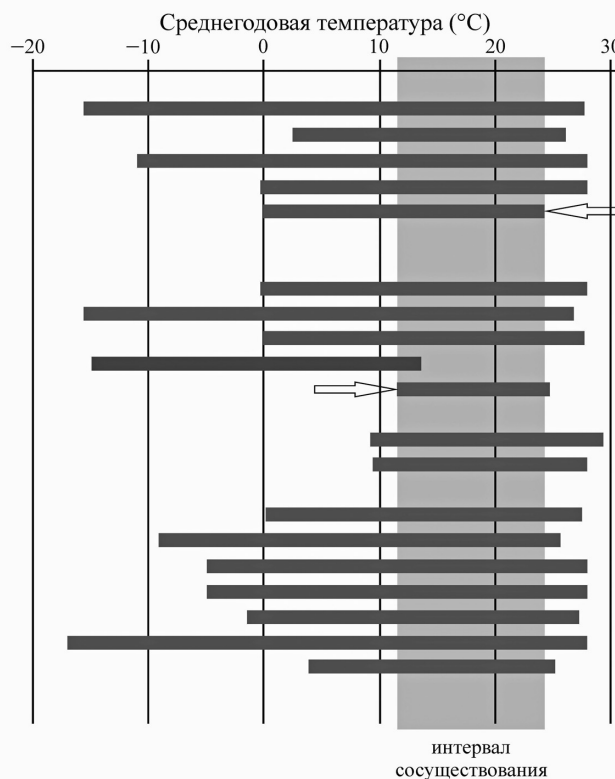


Рис. 2. Применение метода сосуществования на примере конкретной флоры.

Fig. 2. Application of the Coexistence Approach exemplified by the specific flora.

ков (от 874 до 1352 мм). В широтном градиенте в направлении с севера на юг наблюдается слабо выраженный тренд на увеличение средних значений температуры, но при этом наблюдается еще более слабо выраженный тренд на снижение средних значений для среднегодового количества осадков (рис. 3). В высоких широтах минимальные и максимальные значения интервала сосуществования для среднегодовых температур составляют 13.8–18.5 °C, для среднегодового количества осадков – 961–1577 мм. В средних широтах такие значения интервалов сосуществования сильно варьируют. Для среднегодовых температур они приходятся на 13.6–24.2 °C, для среднегодового количества осадков минимальные значения интервала колеблются в пределах 740–1092 мм, а максимальные – в пределах 1096–1724 мм. Для более низких широт значения интервалов сосуществования для среднегодовой температуры колеблются в пределах 11.6–24.0 °C, для среднегодового количества осадков – 652–1823 мм.

В результате на основе средних значений интервалов сосуществования нами выделяются

три региональных климатических зоны (рис. 4). I климатическая зона ($\approx 55^\circ$ палеошироты и севернее) – зона теплого умеренного климата – характеризуется более низкими среднегодовыми температурами (14.2–16.2 °C) и более высокими среднегодовыми осадками (1158–1334 мм). II климатическая зона ($\approx 45^\circ$ – 55° палеошироты) является переходной, среднегодовые температуры в этой зоне варьируют от 15.9 до 19.0 °C, а среднегодовые осадки – от 874 до 1352 мм. III климатическая зона ($\approx 45^\circ$ палеошироты и южнее) – зона субтропического климата – характеризуется более высокими температурами (16.5–19.1 °C) и более низкими осадками (874–1263 мм).

ОБСУЖДЕНИЕ

Начало раннего эоцена характеризуется существенным потеплением климата (Westerhold et al., 2020), которое оценивается в 3 °C, что вызвало заметное расширение тропической и субтропической зон Земного шара с их экспансией в более высокие широты (Ахметьев, 2004). Это, в свою очередь, сопровождалось сокращением умеренной и теплоумеренной зон в высоких ши-

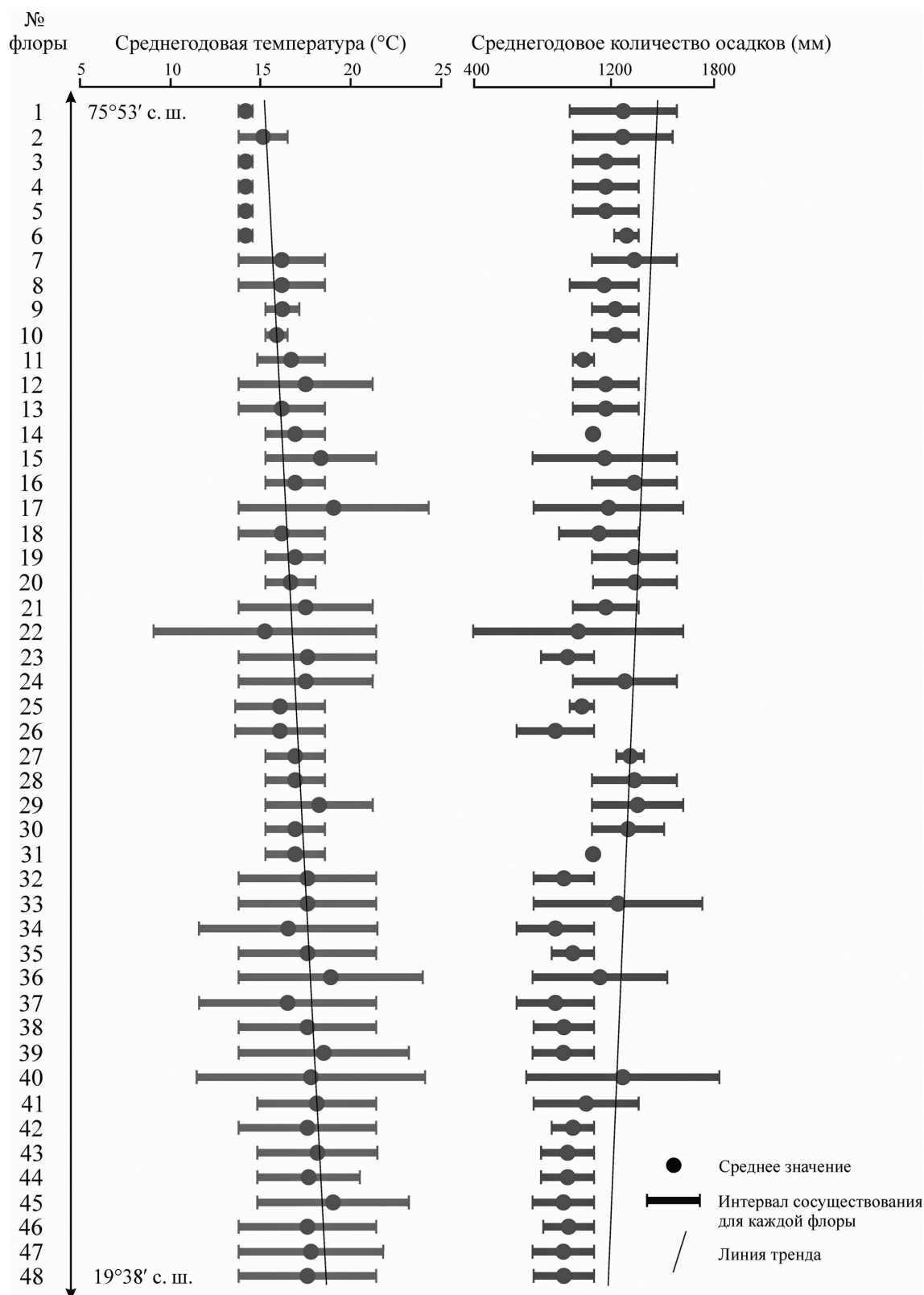


Рис. 3. Интервалы сосуществования и средние значения для среднегодовой температуры и среднегодового количества осадков, полученные для каждой палинофлоры.

Fig. 3. The coexistence intervals and values for mean annual temperature and mean annual precipitation obtained for each palynoflora.

ротах и снижением широтного температурного градиента от полюса к экватору. Одной из специфических особенностей глобального климата в

раннем эоцене было широкое распространение паратропического влажного климата (Ахметьев, 2004).

В целом, в раннем эоцене на востоке Азии реконструируются высокие значения температуры (Bondarenko, Utescher, 2022), со слабо выраженным широтным градиентом, составлявшим всего $\approx 1/3$ от современного (Wolfe 1978; Greenwood, Wing 1995) или даже меньше (Bondarenko, Utescher, 2022). Данные по температуре хорошо коррелируют с высоким уровнем осадков для высоких и средних широт востока Азии в раннем эоцене по сравнению с современным (Bondarenko, Utescher, 2023a). Это совпадает с информацией авторов (рис. 3).

Согласно нашим данным, пространственное распределение средних значений среднегодовой температуры и среднегодового количества осадков (рис. 4) предполагает существование трех региональных климатических режимов на востоке Азии в раннем эоцене: зоны теплого умеренного климата ($\approx 55^\circ$ палеошироты и севернее), переходной зоны ($\approx 45\text{--}55^\circ$ палеошироты) и зоны субтропического климата ($\approx 45^\circ$ палеошироты и южнее).

В пределах изученной нами территории М. А. Ахметьев (2004) также выделяет три климатических режима для раннего эоцена (рис. 4):

зону умеренного и умеренно-теплого влажного климата в высоких широтах, зону субтропического и паратропического влажного климата в средних широтах и зону сухих субтропиков в центральных и южных районах Китая. По мнению М. А. Ахметьева (2004), зона умеренного и умеренно-теплого влажного климата в Сибири и притихоокеанских регионах Азии и Северной Америки опускалась к средним широтам и характеризовалась среднегодовым количеством осадков от 1000 до 2000, местами до 4000 мм. М. А. Ахметьев (2004) не приводит каких-либо значений среднегодовых температур для этой климатической зоны на востоке Азии, но Л. Ю. Буданцев (1999) для раннеэоценовых листовых флор Северной Якутии и Дальнего Востока приводит 9.7°C для среднегодовых температур и около 1200 мм для среднегодовых осадков. Эти значения ниже реконструированных нами по палинофлорам для востока Азии. Однако для первой половины раннего эоцена Северной Якутии (Быковская протока, $72^\circ 20'$ с. ш.) О. В. Бондаренко и соавторы (2022) по пыльце оценивают среднегодовые температуры на уров-

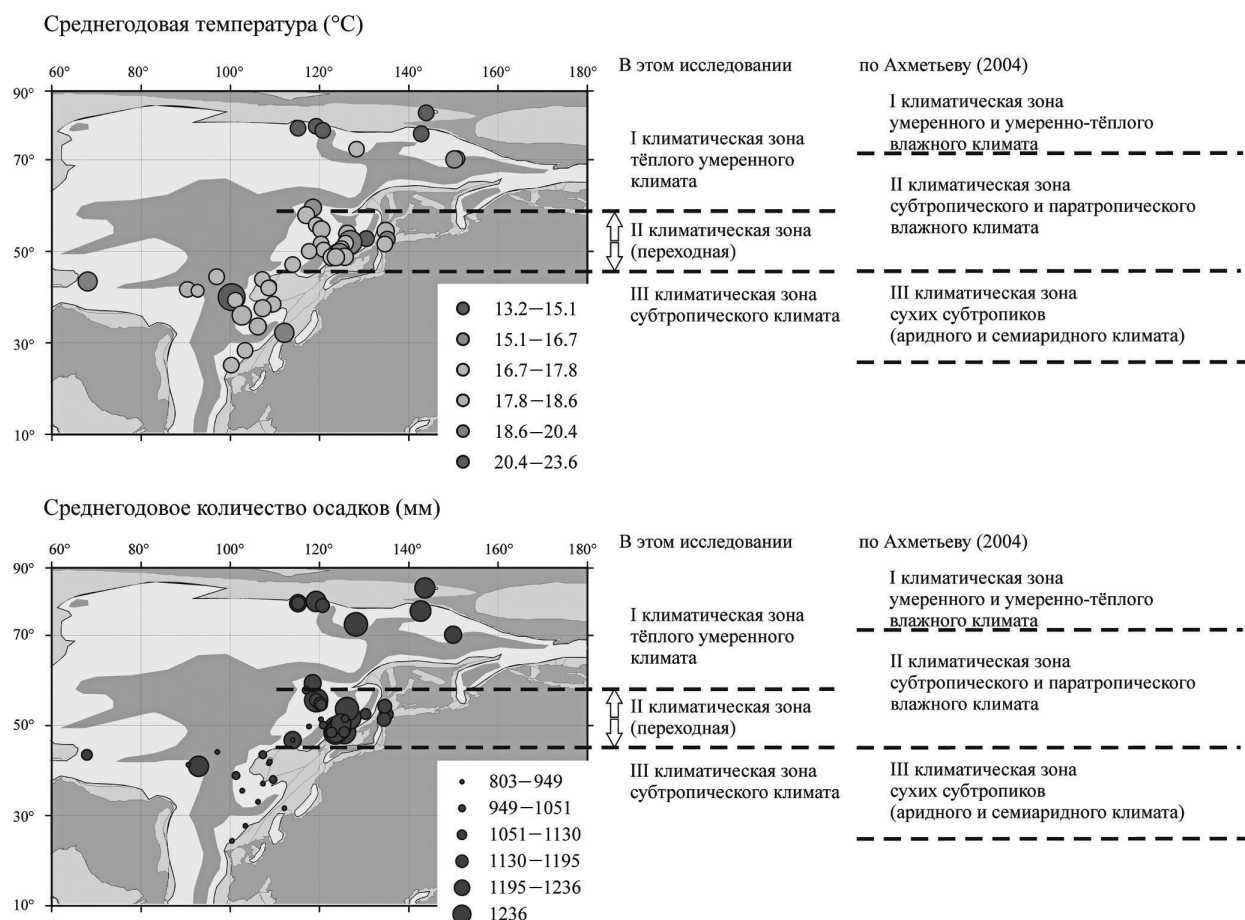


Рис. 4. Пространственное распределение средних значений среднегодовой температуры и среднегодового количества осадков на территории востока Азии в раннем эоцене.

Fig. 4. Spatial distributions of values of mean annual temperature and mean annual precipitation in East Asia's Early Eocene.

не 14.5 °C и даже до 21.8 °C – во время гипертермальных событий, со среднегодовыми осадками 1200–1300 мм. Для второй половины раннего эоцена в Северной Якутии (оз. Тастах, 69° 90' с. ш.) О. В. Бондаренко и Т. Утешер (2023b) по пыльце приводят близкие значения среднегодовых температур (14.2–21.8 °C) и среднегодовых осадков (1100–1400 мм).

Для раннеэоценовых или ранне-среднеэоценовых листовых флор Канадского Арктического архипелага (79° 55' с. ш.) среднегодовая температура, рассчитанная Д. Г. Гринвудом и С. Л. Вингом (1995), составляет 9.3 °C, а среднегодовые осадки – 1000–2000 мм. Немного южнее (штат Вашингтон) для ранне-среднеэоценовой флоры Puget среднегодовые температуры оцениваются в диапазоне 18–23 °C (Wolfe et al., 1998). По мнению Дж. А. Вулфа (1994, 1995), основанного на данных по листовым флорам для тихоокеанского региона Северной Америки, среднегодовая температура эоцена в целом была высокой, при этом среднегодовая температура на 70° палеошироты в раннем эоцене была около 19 °C.

Очень теплые условия в раннем эоцене в высоких широтах подтверждаются результатами, полученными по другим данным. Высокие значения среднегодовых температур (≈ 16 –21 °C (Suan et al., 2017) и ≈ 18 –25 °C (Weijers et al., 2007)) и температур поверхности моря (≈ 18 –25 °C (Sluijs et al., 2009)) получены на основе тетраэфирных мембранных липидов, обнаруженных в раннем эоцене в высоких широтах (IODP, участок 302, хр. Ломоносова). Кроме того, высокие температуры в раннем–среднем эоцене Арктической Канады и Гренландии (8 и 17 °C) реконструируются по фаунистическим и другим косвенным данным (Markwick, 1994; Eldrett et al., 2009; Huber, Caballero, 2011). Очень высокие значения температуры поверхности моря и среднегодовых температур, указанные в вышеупомянутых исследованиях для высоких широт, и высокие континентальные температуры, которые мы реконструируем для востока Азии к северу от 55° палеошироты, свидетельствуют о том, что экстремально теплый ранний эоцен был панарктическим явлением.

В пределах выделенной нами II климатической зоны (≈ 45 –55° палеошироты) среднегодовые температуры варьируют от 15.9 до 19.0 °C, а среднегодовые осадки – от 874 до 1352 мм. Эта зона является переходной. Согласно М. А. Ахметьеву (2004), это была зона влажного субтропического климата в средних широтах (до $\approx 45^\circ$ с. ш.). Исследователь не приводит каких-либо значений среднегодовых температур для этой климатической зоны, но оценивает среднегодовое количество осадков до 1000 мм. В пределах изученной нами территории эта зона фиксируется райчихинской флорой (13 Райчихинск, рис. 1), а на территории Китая охватывает южную Маньчжу-

рию (32 и 33 Fushun, рис. 1). Для тихоокеанского региона Северной Америки Дж. А. Вулф (1994, 1995) на основании данных по листовым флорам предполагает, что среднегодовая температура на 45° палеошироты в раннем эоцене была выше 27 °C. Региональные исследования (Bondarenko et al., 2020a), проведенные по раннеэоценовым микро- и макрофлорам Приморья, показали среднегодовые температуры в диапазоне 15.1–18.2 °C, а среднегодовые осадки – 1047–1554 мм.

Следующей климатической зоной, согласно М. А. Ахметьеву (2004), является зона сухих субтропиков. Исследователь не приводит каких-либо значений среднегодовых температур и осадков для этой климатической зоны. По результатам некоторых работ (Liu, 1997; Wang et al., 1999; Zhang et al., 2012) в палеогене Восточной Азии выделяется широкая засушливая зона вдоль 30° (от $\approx 25^\circ$ до $\approx 35^\circ$ с. ш.). Более низкий уровень осадков по сравнению с нашими данными в целом соответствует концепции существования более «сухой» зоны на этих широтах в раннем эоцене, но при этом более высокие средние значения среднегодовых осадков (874–1263 мм), полученные нами, не поддерживают наличие реально сухих условий. Например, Цюань с соавторами (2012a, б) для раннего эоцена Китая также указывают количество среднегодовых осадков в диапазоне 1000–1200 мм, что соответствует полученным нами значениям. Недавние исследования флор среднего и позднего эоцена на юге Китая выявили влажные субтропические условия, при этом оценки по листовым флорам для раннего эоцена соответствуют реконструированным нами данным (Jin et al., 2017).

Более примечательным для выделенной нами III климатической зоны, расположенной южнее 45° с. ш., является уровень среднегодовых температур ниже ожидаемого (16.5–19.1 °C). При среднегодовой температуре, не превышающей 24.0 °C, температуры в изучаемом диапазоне палеоширот южнее 45° не достигали тропического уровня. Эти данные совпадают с результатами, полученными для раннего эоцена востока Азии по всем температурным параметрам (Bondarenko, Utescher, 2022). Такие температуры являются «прохладными», учитывая низкую палеошироту в раннем эоцене и условия глобально теплого климата (Zachos et al., 2008). О подобных «прохладных» условиях для Южного Китая ранее сообщалось в исследовании температурных аномалий по отношению к настоящему времени с учетом среднего эоцена (Utescher et al., 2011). Кроме того, недавние реконструкции для среднего и позднего эоцена Южного Китая на основе листовых флор также выявили сравнительно прохладные условия, при этом полученные относительно низкие значения температуры соответствуют реконструированным в

этой статье показателям – 20–24 °C (Jin et al., 2017). Наши оценки температуры на основе палеоботанических данных востока Азии в раннем эоцене на широтах 20–30°, как правило, близки к современному уровню или даже ниже его. Это позволяет предположить, что климат в низких широтах в эоцене, возможно, не был равномерно теплым (Spicer et al., 2014; Jin et al., 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа 48 палинофлор определены количественные климатические показатели температуры и осадков и прослежены их изменения на востоке Азии в раннем эоцене. Полученные результаты заполняют региональный пробел в палеоклиматических данных по Евразии. Недостаток данных по Дальнему Востоку России и Восточной Сибири серьезно затрудняет их понимание в глобальном контексте. В целом фиксируются высокие средние значения среднегодовой температуры, реконструируемые по палинофлорам востока Азии в раннем эоцене. Наши данные также показывают более высокий уровень осадков для высоких и средних широт востока Азии в раннем эоцене по сравнению с современным. Это хорошо коррелирует с более высокими значениями температуры, а также с широтными градиентами температуры в раннем эоцене. Широтный градиент температуры и осадков в направлении с севера на юг оценивается как слабо выраженный. Тем не менее, полученные нами данные позволяют выделить три климатические зоны: зону теплого умеренного климата (севернее $\approx 55^\circ$ палеошироты), переходную зону ($\approx 45\text{--}55^\circ$ палеошироты) и зону субтропического климата (южнее $\approx 45^\circ$ палеошироты).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность к. г.-м. н. М. В. Черепановой (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН) за ценные замечания в ходе написания статьи. Эта работа является вкладом в NECLIME (Neogene Climate Evolution in Eurasia).

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда № 22-27-00098, <https://rscf.ru/project/22-27-00098/>.

ЛИТЕРАТУРА

- Ахметьев М. А. Климат Земного шара в палеоэоцене и эоцене по данным палеоботаники // Климат в эпохи крупных биосферных перестроек. (Труды ГИН РАН. Вып. 550). Москва : Наука, 2004. С. 8–47.
- Болотникова Т. Н. Палинологическая характеристика и возраст угленосных отложений Чернышевского бурогоугольного месторождения (Южное Приморье) // Тихоокеанская геология. 1988. № 4. С. 101–105.
- Буданцев Л. Ю. Позднеэоценовая флора Западной Камчатки. (Труды БИН РАН. Вып. 19). Санкт-Петербург : Petro-RIF, 1997. 115 с.
- Буданцев Л. Ю. Реконструкция кайнозойских климатов на востоке северной Азии по палеоботаническим данным // Ботанический журнал. 1999. Т. 84. № 10. С. 36–45.
- Варнавский В. Г., Седых А. К., Рыбалко В. И. Палеоген и неоген Приамурья и Приморья. Владивосток : ДВО АН СССР, 1988. 184 с.
- Гладенков Ю. Б., Баженова О. К., Гречин В. И., Маргулис Л. С., Сальников Б. А. Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность. Москва : ГЕОС, 2002. 225 с.
- Гриненко О. В., Жарикова Л. П., Фрадкина А. Ф. Палеоген и неоген Северо-Востока СССР. Якутск : Изд-во ЯНЦ СО АН СССР, 1989. 184 с.
- Гриненко О. В., Сергеев А. И., Белолюбский И. Н. Стратиграфия палеогеновых и неогеновых отложений Северо-Востока России // Отечественная геология. 1997. № 8. С. 14–20.
- Зива М. В., Лукашова Л. И. Палинологическая характеристика палеогеновых и неогеновых отложений Среднеамурской впадины // Стратиграфия кайнозойских отложений Дальнего Востока. Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 42–47.
- Кезина Т. В. Палинотратиграфия угленосных отложений позднего мела и кайнозоя Верхнего Приамурья. Владивосток : Дальнаука, 2005. 206 с.
- Кезина Т. В., Олькин Г. Ф. Палинологическая характеристика кайнозойских отложений Снежногорского углепрооявления (Верхнезейская впадина) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2000. Т. 8. № 5. С. 65–72.
- Кодрул Т. М. Фитостратиграфия палеогена южного Сахалина (Труды ГИН РАН. Вып. 519). Москва : Наука, 1999. 150 с.
- Кулькова И. А. Палинологические исследования эоценовых отложений Яно-Индигоирской низменности. Новосибирск : Наука, 1973. 116 с.
- Лаухин С. А., Гриненко О. В., Фрадкина А. Ф. Эволюция климата кайнозоя Арктического побережья Северо-Востока Азии // Известия РАН. Серия Геологическая. 1992. № 1. С. 131–139.
- Павлюткин Б. И., Петренко Т. И. Стратиграфия палеоген-неогеновых отложений Приморья. Владивосток : Дальнаука, 2010. 164 с.
- Фотьянова Л. И., Серова М. Я., Гальверсен В. Г., Жаров А. Э., Грохотова Н. М., Тузов В. П. Опорный разрез палеогеновых отложений полуострова Крыльон (Южный Сахалин, р. Китосия) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2001. Т. 9. № 2. С. 58–76.
- Фрадкина А. Ф. Палинотратиграфия палеогеновых и неогеновых отложений Северо-Востока России. Новосибирск : Сибирское отделение РАН, 1995. 82 с.
- Bondarenko O. V., Blokhina N. I., Evstigneeva T. A., Utescher T. Short-term climate and vegetation dynamics in Lena River Delta (northern Yakutia, Eastern Siberia) during the early Eocene // Palaeoworld. 2022. Vol. 31. No. 3. P. 521–541.
- Bondarenko O. V., Blokhina N. I., Mosbrugger V., Utescher T. Paleogene climate dynamics in the Primorye Region, Far East of Russia, based on a Coexistence Approach analysis of palaeobotanical data // Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments. 2020. Vol. 100. No. 1. P. 5–31.
- Bondarenko O. V., Utescher T. Early Paleogene continental temperature patterns and gradients over eastern Eurasia // Journal of Asian Earth Sciences. 2022. Vol. 239. Art. 105401.
- Bondarenko O. V., Utescher T. Early Paleogene precipitation patterns over East Asia: Was there a monsoon

- after all? // *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*. 2023a. DOI: 10.1007/s12549-023-00586-y.
- Bondarenko O. V., Utescher T. Late Early to Early Middle Eocene climate and vegetation change at Tastakh Lake (northern Yakutia, Eastern Siberia) // *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*. 2023b. Vol. 103. No. 2. P. 277–301.
- Bondarenko O. V., Utescher T., Blokhina N. I., Evstigneeva T. A., Kezina T. V. Temporal climate and vegetation gradient of the Paleocene in the Amur Region (Far East of Russia) // *Botanica Pacifica*. 2020b. Vol. 9. No. 2. P. 13–35.
- Eldrett J. S., Greenwood D. R., Harding I. C., Huber M. Increased seasonality through the Eocene to Oligocene transition in northern high latitudes // *Nature*. 2009. Vol. 459. P. 969–973.
- Greenwood D. R., Wing S. L. Eocene continental climates and latitudinal temperature gradients // *Geology*. 1995. Vol. 23. P. 1044–1048.
- Huber M., Caballero R. The early Eocene equable climate problem revisited // *Climate of the Past*. 2011. Vol. 7. P. 603–633.
- Jin J. H., Herman A. B., Spicer R. A., Kodrul T. M. Palaeoclimate background of the diverse Eocene floras of South China // *Science Bulletin*. 2017. Vol. 62. P. 1501–1503.
- Liu T. Geological environments in China and global change // *Origin and History of the Earth (Proceedings of the 30th International Geological Congress, Vol. 1)*. Zeist : CRC Press, 1997. P. 15–26.
- Markwick P. J. “Equability”, continentality and Tertiary “climate”: The crocodilian perspective // *Geology*. 1994. Vol. 22. P. 613–616.
- Moiseeva M. G., Kodrul T. M., Herman A. B. Early Paleocene Boguchan flora of the Amur Region (Russian Far East): Composition, age and palaeoclimatic implications // *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2018. Vol. 253. P. 15–36.
- Mosbrugger V., Utescher T. The coexistence approach – a method for quantitative reconstructions of Tertiary terrestrial palaeoclimate data using plant fossils // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1997. Vol. 134. P. 61–86.
- Quan C., Liu (Y. S.) C., Utescher T. Eocene monsoon prevalence over China: A palaeobotanical perspective // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2012a. Vol. 365–366. P. 302–311.
- Quan C., Liu (Y. S.) C., Utescher T. Paleogene temperature gradient, seasonal variation and climate evolution of northeast China // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2012b. Vol. 313–314. P. 150–161.
- Sluijs A., Schouten S., Donders T. H., Schoon P. L., Röhl U., Reichert G.-J., Sangiorgi F., Kim J.-H., Sinninghe Damsté J. S., Brinkhuis H. Warm and wet conditions in the Arctic region during Eocene Thermal Maximum 2 // *Nature Geoscience*. 2009. Vol. 2. No. 11. P. 777–780.
- Spicer R. A., Herman A. B., Liao W., Spicer T. E. V., Kodrul T., Yang J., Jin J. Cool tropics in the Middle Eocene: Evidence from the Changchang Flora, Hainan Island, China // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2014. Vol. 412. P. 1–16.
- Suan G., Popescu S.-M., Suc J.-P., Schnyder J., Fauchette S., Baudin F., Yoon D., Piepjohn K., Sobolev N. N., Labrousse L. Subtropical climate conditions and mangrove growth in Arctic Siberia during the Early Eocene // *Geology*. 2017. Vol. 45. P. 539–542.
- Utescher T., Bondarenko O. V., Mosbrugger V. The Cenozoic Cooling – continental signals from the Atlantic and Pacific side of Eurasia // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 415. P. 121–133.
- Utescher T., Bruch A. A., Micheels A., Mosbrugger V., Popova S. Cenozoic climate gradients in Eurasia – a palaeo-perspective on future climate change? // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2011. Vol. 304. P. 351–358.
- Utescher T., Mosbrugger V. The Palaeoflora Database. 2018. URL: www.palaeoflora.de (дата обращения 08.08.2020).
- Wang J., Wang Y. J., Liu Z. C., Li J. Q., Xi P. Cenozoic environmental evolution of the Qaidam Basin and its implications for the uplift of the Tibetan Plateau and the drying of Central Asia // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1999. Vol. 152. P. 37–47.
- Wang Q., Ferguson D. K., Feng G. P., Ablaev A. G., Wang Y. F., Yang J., Li Y. L., Li C. S. Climatic change during the Palaeocene to Eocene based on fossil plants from Fushun, China // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2010. Vol. 295. P. 323–331.
- Weijers J. W. H., Schouten S., Sluijs A., Brinkhuis H., Sinninghe Damsté J. S. Warm arctic continents during the Palaeocene–Eocene thermal maximum // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. Vol. 261. No. 1. P. 230–238.
- Westerhold T., Marwan N., Drury A. J., Liebrand D., Agnini C., Anagnostou E., Barnett J. S. K., Bohaty S. M., De Vleeschouwer D., Florindo F., Frederichs T., Hodell D. A., Holbourn A., Kroon D., Lauretano V., Littler K., Lourens L. J., Lyle M. W., Pälike H., Röhl U., Tian J., Wilkens R. H., Wilson P. A., Zachos J. C. An astronomically dated record of Earth’s climate and its predictability over the last 66 million years // *Science*. 2020. Vol. 369. P. 1383–1387.
- Wolfe J. A. A paleobotanical interpretation of Tertiary climates in the Northern Hemisphere // *American Scientist*. 1978. Vol. 66. P. 694–703.
- Wolfe J. A. Paleoclimatic estimates from Tertiary leaf assemblages // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1995. Vol. 23. No. 1. P. 119–142.
- Wolfe J. A. Tertiary climatic changes at middle latitudes of western North America // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1994. Vol. 108. P. 195–205.
- Wolfe J. A., Forest C. E., Molnar P. Paleobotanical evidence of Eocene and Oligocene paleoaltitudes in midlatitude western North America // *Geological Society of America Bulletin*. 1998. Vol. 110. No. 5. P. 664–678.
- Yao Y. F., Bera S., Ferguson D. K., Mosbrugger V., Paudyal K. N., Jin J. H., Li C. S. Reconstruction of paleovegetation and paleoclimate in the Early and Middle Eocene, Hainan Island, China // *Climatic Change*. 2009. No. 92. P. 169–189.
- Zachos J. C., Dickens G. R., Zeebe R. E. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics // *Nature*. 2008. Vol. 451. P. 279–283.
- Zhang Z., Flatoy F., Wang H., Bethke I., Bentsen M., Guo Z. Early Eocene Asian climate dominated by desert and steppe with limited monsoons // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012. Vol. 44. P. 24–35.

SPATIAL RECONSTRUCTION OF THE EAST ASIA CLIMATE IN THE EARLY EOCENE

O. V. Bondarenko¹, T. A. Evstigneeva¹, A. A. Zhmerenetsky¹, R. Z. Allaguvatova¹, T. Utescher^{2,3}

¹ Federal Research Center for Terrestrial Biodiversity of East Asia, FEB RAS, Vladivostok

² Senckenberg Research Institute and Natural History Museum, Frankfurt-on-Main, Germany,

³ Institute for Geosciences, University of Bonn, Bonn, Germany

Using the Coexistence Approach, climatic zones were identified for the Early Eocene of East Asia. Data for reconstruction include 48 palynofloras from the East Asia's Lower Eocene continental deposits from 75° to 19° N. The climatic inferences obtained are consistent with global trends, showing high values of mean annual temperature (MAT) and mean annual precipitation (MAP). According to our results, there is a weakly expressed latitudinal temperature gradient from the north to the south, showing an increasing trend for MAT values, while a very weakly expressed latitudinal gradient of precipitation demonstrates a decreasing trend for MAP values. Based on MAT and MAP values, three regional climatic zones are distinguished. The warm moderate climate zone (north of $\approx 55^\circ$ paleolatitude) is characterized by low values for temperature (14.2–16.2 °C) and high ones for precipitation (1158–1334 mm). In the transition zone (≈ 45 – 55° paleolatitude), MAT values vary from 15.9 to 19.0 °C, and MAP values range from 874 to 1352 mm. The subtropical climate zone (south of $\approx 45^\circ$ paleolatitude) is characterized by high values for temperature (16.5–19.1 °C) and low, for precipitation (874–1263 mm).

Keywords: quantitative reconstruction, mean annual temperature, mean annual precipitation, latitudinal gradient, climatic zones.

REFERENCES

- Akhmetiev, M. A., 2004. The Paleocene and Eocene Global Climate on Paleobotanical Evidences, *Transactions of the Geological Institute RAS*, 550 (*Climate in the Epochs of Major Biospheric Transformations*). Moscow, Nauka, 8–47 [In Russian].
- Bolotnikova, T. N., 1988. Palynological Characteristics and Age of Coal-Bearing Deposits of the Chernyshevsky Brown Coal Field (Southern Primorye), *Pacific Geology*, 4, 101–105 [In Russian].
- Bondarenko, O. V., Blokhina, N. I., Evstigneeva, T. A., Utescher, T., 2022. Short-Term Climate and Vegetation Dynamics in Delta Lena River (Northern Yakutia, Eastern Siberia) during the Early Eocene, *Palaeoworld*, 31 (3), 521–541.
- Bondarenko, O. V., Blokhina, N. I., Mosbrugger, V., Utescher, T., 2020. Paleogene Climate Dynamics in the Primorye Region, Far East of Russia, Based on a Coexistence Approach Analysis of Palaeobotanical Data, *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 100 (1), 5–31.
- Bondarenko, O. V., Utescher, T., 2022. Early Paleogene Continental Temperature Patterns and Gradients over Eastern Eurasia, *Journal of Asian Earth Sciences*, 239, 105401.
- Bondarenko, O. V., Utescher, T., 2023. Early Paleogene Precipitation Patterns over East Asia: Was There a Monsoon after All? *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*. DOI: 10.1007/s12549-023-00586-y.
- Bondarenko, O. V., Utescher, T., 2023. Late Early to Early Middle Eocene Climate and Vegetation Change at Tastakh Lake (Northern Yakutia, Eastern Siberia), *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 103 (2), 277–301.
- Bondarenko, O. V., Utescher, T., Blokhina, N. I., Evstigneeva, T. A., Kezina, T. V., 2020. Temporal Climate and Vegetation Gradient of the Paleocene in the Amur Region (Far East of Russia), *Botanica Pacifica*, 9 (2), 13–35.
- Budantsev, L. Yu., 1997. Late Eocene Flora of Western Kamchatka, *Transactions of BIN RAS*, 19. St. Petersburg, Petro-RIF [In Russian].
- Budantsev, L. Yu., 1999. The Reconstruction of the Cenozoic Climates in Eastern North Asia Based on Palaeobotanical Data, *Botanicheskii Zhurnal*, 84 (10), 36–45 [In Russian].
- Eldrett, J. S., Greenwood, D. R., Harding, I. C., Huber, M., 2009. Increased Seasonality through the Eocene to Oligocene Transition in Northern High Latitudes, *Nature*, 459, 969–973.
- Fotyanova, L. I., Serova, M. Ya., Galversen, V. G., Zharov, A. E., Grokhotova, N. M., Tuzov, V. P., 2001. The Paleogene Reference Section of the Kril'on Peninsula (the Kitosiya River, Southern Sakhalin), *Stratigraphy and Geological Correlation*, 9 (2), 58–76 [In Russian].
- Fradkina A. F., 1995. Palynostratigraphy of Paleogene and Neogene Sediments of North-Eastern Russia. Novosibirsk, SB RAS [In Russian].
- Gladenkov, Yu. B., Bazhenova, O. K., Grechin, V. I., Margulis, L. S., Salnikov, B. A., 2002. The Cenozoic Geology and the Oil and Gas Presence in Sakhalin. Moscow, GEOS [In Russian].
- Greenwood, D. R., Wing, S. L., 1995. Eocene Continental Climates and Latitudinal Temperature Gradients, *Geology*, 23, 1044–1048.
- Grinenko, O. V., Sergeenko, A. I., Belolyubskiy, I. N., 1997. Stratigraphy of the Paleogenic and Neogenic Deposits in Russia's North-East, *Otechestvennaya Geologiya*, 8, 14–20 [In Russian].
- Grinenko, O. V., Zharikova, L. P., Fradkina, A. F., 1989. The Paleogene and Neogene of the North-Eastern USSR. Yakutsk, YSC SB AS USSR [In Russian].
- Huber, M., Caballero, R., 2011. The Early Eocene Equable Climate Problem Revisited, *Climate of the Past*, 7, 603–633.

- Jin, J. H., Herman, A. B., Spicer, R. A., Kodrul, T. M., 2017. Palaeoclimate Background of the Diverse Eocene Floras of South China, *Science Bulletin*. 62, 1501–1503.
- Kezina, T. V., 2005. Palynostratigraphy of Late Cretaceous and Cenozoic Coal-bearing Deposits in the Upper Priamurye. Vladivostok, Dalnauka [In Russian].
- Kezina, T. V., Olkin, G. F., 2000. Palynological Characteristics of Cenozoic Coal-Bearing Deposits, the Snezhnogorskiy Locality in the Verkhnyaya Zeya Basin, *Stratigraphy and Geological Correlation*. 8 (5), 482–490 [In Russian].
- Kodrul, T. M., 1999. Paleogene Phytostratigraphy of South Sakhalin. *Transactions of the Geological Institute RAS*, 519. Moscow, Nauka [In Russian].
- Kulkova, I. A., 1973. Palynological Studies of the Eocene Deposits of the Yana-Indigirka Lowland. Novosibirsk, Nauka [In Russian].
- Laukhin, S. A., Grinenko, O. V., Fradkina, A. F., 1992. Climate Evolution in the Cenozoic on the Arctic Coast of Northeast Asia, *Bulletin of RAS. Geological Series*. 1, 131–139 [In Russian].
- Liu, T., 1997. Geological Environments in China and Global Change, *Proceedings of the 30th International Geological Congress, 1 (Origin and History of the Earth)*. Zeist, CRC Press, 15–26.
- Markwick, P. J., 1994. “Equability”, Continentality and Tertiary “Climate”: The Crocodilian Perspective, *Geology*. 22, 613–616.
- Moiseeva, M. G., Kodrul, T. M., Herman, A. B., 2018. Early Paleocene Boguchan Flora of the Amur Region (Russian Far East): Composition, Age and Palaeoclimatic Implications, *Review of Palaeobotany and Palynology*. 253, 15–36.
- Mosbrugger, V., Utescher, T., 1997. The Coexistence Approach – a Method for Quantitative Reconstructions of Tertiary Terrestrial Palaeoclimate Data Using Plant Fossils, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 134, 61–86.
- Pavlyutkin, B. I., Petrenko, T. I., 2010. Stratigraphy of Paleogene–Neogene Sediments in Primorye. Vladivostok, Dalnauka [In Russian].
- Quan, C., Liu, (Y. S.) C., Utescher, T., 2012a. Eocene Monsoon Prevalence over China: A Palaeobotanical Perspective, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 365–366, 302–311.
- Quan, C., Liu, (Y. S.) C., Utescher, T., 2012b. Paleogene Temperature Gradient, Seasonal Variation and Climate Evolution of Northeast China, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 313–314, 150–161.
- Sluijs, A., Schouten, S., Donders, T. H., Schoon, P. L., Röhl, U., Reichert, G.-J., Sangiorgi, F., Kim, J.-H., Sinninghe Damsté, J. S., Brinkhuis, H., 2009. Warm and Wet Conditions in the Arctic Region during Eocene Thermal Maximum 2, *Nature Geoscience*. 2 (11), 777–780.
- Spicer, R. A., Herman, A. B., Liao, W., Spicer, T. E. V., Kodrul, T., Yang, J., Jin, J., 2014. Cool Tropics in the Middle Eocene: Evidence from the Changchang Flora, Hainan Island, China, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 412, 1–16.
- Suan, G., Popescu, S.-M., Suc, J.-P., Schnyder, J., Fauquette, S., Baudin, F., Yoon, D., Piepjohn, K., Sobolev, N. N., Labrousse, L., 2017. Subtropical Climate Conditions and Mangrove Growth in Arctic Siberia during the Early Eocene, *Geology*. 45, 539–542.
- Utescher, T., Bondarenko, O. V., Mosbrugger, V., 2015. The Cenozoic Cooling – Continental Signals from the Atlantic and Pacific Side of Eurasia, *Earth and Planetary Science Letters*. 415, 121–133.
- Utescher, T., Bruch, A. A., Micheels, A., Mosbrugger, V., Popova, S., 2011. Cenozoic Climate Gradients in Eurasia – a Palaeo-Perspective on Future Climate Change? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 304, 351–358.
- Utescher, T., Mosbrugger, V., 2018. *The Palaeoflora Database*. URL: www.palaeoflora.de (accessed 08.08.2020).
- Varnavsky, V. G., Sedykh, A. K., Rybalko, V. I., 1988. Paleogene and Neogene of the Amur Region and Primorye. Vladivostok, FEB AS USSR [In Russian].
- Wang, J., Wang, Y. J., Liu, Z. C., Li, J. Q., Xi, P., 1999. Cenozoic Environmental Evolution of the Qaidam Basin and Its Implications for the Uplift of the Tibetan Plateau and the Drying of Central Asia, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 152, 37–47.
- Wang, Q., Ferguson, D. K., Feng, G. P., Ablav, A. G., Wang, Y. F., Yang, J., Li, Y. L., Li, C. S., 2010. Climatic Change during the Palaeocene to Eocene Based on Fossil Plants from Fushun, China, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 295, 323–331.
- Weijers, J. W. H., Schouten, S., Sluijs, A., Brinkhuis, H., Sinninghe Damsté, J. S., 2007. Warm Arctic Continents during the Palaeocene–Eocene Thermal Maximum, *Earth and Planetary Science Letters*. 261 (1), 230–238.
- Westerhold, T., Marwan, N., Drury, A. J., Liebrand, D., Agnini, C., Anagnostou, E., Barnett, J. S. K., Bohaty, S. M., De Vleeschouwer, D., Florindo, F., Frederichs, T., Hodell, D. A., Holbourn, A., Kroon, D., Lauretano, V., Littler, K., Lourens, L. J., Lyle, M. W., Pälike, H., Röhl, U., Tian, J., Wilkens, R. H., Wilson, P. A., Zachos, J. C., 2020. An Astronomically Dated Record of Earth's Climate and Its Predictability over the Last 66 Million Years, *Science*. 369, 1383–1387.
- Wolfe, J. A., 1978. A Paleobotanical Interpretation of Tertiary Climates in the Northern Hemisphere, *American Scientist*. 66, 694–703.
- Wolfe, J. A., 1995. Tertiary Climatic Changes at Middle Latitudes of Western North America, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 108, 195–205.
- Wolfe, J. A., 1995. Paleoclimatic Estimates from Tertiary Leaf Assemblages, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 23 (1), 119–142.
- Wolfe, J. A., Forest, C. E., Molnar, P., 1998. Paleobotanical Evidence of Eocene and Oligocene Palealtitudes in Midlatitude Western North America, *Geological Society of America Bulletin*. 110 (5), 664–678.
- Yao, Y. F., Bera, S., Ferguson, D. K., Mosbrugger, V., Paudyal, K. N., Jin, J. H., Li, C. S., 2009. Reconstruction of Paleovegetation and Paleoclimate in the Early and Middle Eocene, Hainan Island, China, *Climatic Change*. 92, 169–189.
- Zachos, J. C., Dickens, G. R., Zeebe, R. E., 2008. An Early Cenozoic Perspective on Greenhouse Warming and Carbon-Cycle Dynamics, *Nature*. 451, 279–283.
- Zhang, Z., Flatoy, F., Wang, H., Bethke, I., Bentsen, M., Guo, Z., 2012. Early Eocene Asian Climate Dominated by Desert and Steppe with Limited Monsoons, *Journal of Asian Earth Sciences*. 44, 24–35.
- Ziva, M. V., Lukashova, L. I., 1977. Palynological Characteristics of the Paleogene and Neogene Deposits in the Middle Amur Basin, *Stratigraphy of the Cenozoic Sediments in the Far East*. Vladivostok, FESC AS USSR, 42–47 [In Russian].