

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 1. Метан

О.Ю. Антохина¹, П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹,
Б.Д. Белан¹, С.Б. Белан¹, Е.В. Гурулева¹, Д.К. Давыдов¹, Г.А. Ивлев¹,
А.В. Козлов¹, К. Law², Т.М. Рассказчикова¹, Ж.-Д. Paris³, Д.Е. Савкин¹,
Д.В. Симоненков¹, Т.К. Складнева¹, Г.Н. Толмачев¹, А.В. Фофонов^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
LATMOS, UMR 8190, Paris, France

³Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSU, CNRS-CEA-UVSQ,
Orme des Merisiers, CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, France

Поступила в редакцию 5.09.2022 г.;
после доработки 23.12.2022 г.;
принята к печати 13.01.2022 г.

В Арктике глобальное потепление происходит в два-три раза быстрее, чем в других регионах земного шара. В результате фиксируются заметные изменения во всех сферах окружающей среды. Однако данных о вертикальном распределении газового и аэрозольного состава воздуха над Российским сектором Арктики крайне мало, поэтому в сентябре 2020 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» был проведен эксперимент по зондированию атмосферы и водной поверхности над акваториями всех морей Северного Ледовитого океана в Российском секторе Арктики. В настоящей работе анализируется пространственное распределение метана. Показано, что в период эксперимента его концентрация была наибольшей над Карским морем (2090 млрд⁻¹), наименьшая – над Чукотским (2005 млрд⁻¹). Незначительно отличались от Чукотского моря по концентрации метана Восточно-Сибирское и Берингово моря. Средние значения CH₄ характерны для Баренцева моря (2030 млрд⁻¹) и моря Лаптевых (2040 млрд⁻¹). Перепад концентраций между уровнем 200 м и свободной тропосферой достигал 150 млрд⁻¹ над Карским морем, уменьшался до 91 и 94 млрд⁻¹ над Баренцевым и морем Лаптевых и еще сильнее снижался над Восточно-Сибирским, Чукотским и Беринговым морями: до 66, 63 и 74 млрд⁻¹ соответственно. Горизонтальная неоднородность в распределении метана над арктическими морями наибольшая над морем Лаптевых – 73 млрд⁻¹, что в два раза выше, чем над Баренцевым и Карским морями и в пять-семь раз выше, чем над Восточно-Сибирским и Беринговым морями.

Ключевые слова: Арктика, атмосфера, воздух, вертикальное распределение, метан, парниковые газы, перенос, примеси, состав; Arctic, atmosphere, air, vertical distribution, methane, greenhouse gases, transport, impurities, composition.

Введение

В настоящее время одной из главных проблем, отнесенных мировым сообществом к «большим вызовам», является глобальное потепление и обусловленное им изменение окружающей среды. Спрогнозированное еще 40 лет назад [1], оно недавно получило еще одно очень веское подтверждение в рабо-

тах [2, 3]: все предыдущие похолодания и потепления на отрезке времени 2000–0 г.н.э. были региональными, а нынешнее охватывает весь земной шар. При этом есть районы Земли, где потепление происходит более быстрыми темпами. К ним относятся и Арктика, где рост температуры воздуха в два-три раза выше, чем над другими регионами [4, 5]. Это явление получило название арктическое усиление [6, 7].

* Ольга Юрьевна Антохина (antokhina@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (arp@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Екатерина Валерьевна Гурулева (katasha@yandex.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев

(ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Katharine Law (kathy.law@latmos.ipsl.fr); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Jean-Daniel Paris (nedp@aero.obs-mip.fr); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

В связи с этим встают закономерные вопросы: как потепление в Арктике влияет на состав воздуха [8–13] и как соотносится с поступающими в регион примесями [14–17]? Ответить на эти вопросы, так же как и наметить план мероприятий по сохранению уязвимой природы Арктики, можно только на основании измерений и анализа прямых и обратных связей между потеплением климата и изменением состава воздуха [18]. Однако таких данных в Российском секторе Арктики не достаточно. В результате складывается ситуация, когда в Арктике происходят необратимые процессы в окружающей среде, требующие немедленного реагирования, а информации о них, даже оценочной, нет. В работе [19] из-за отсутствия данных из Российского сектора Арктики сделан неутешительный вывод, что природоохранные и социально-экономические прогнозы для рассматриваемого региона невозможны.

Исследования состава атмосферы в Арктическом регионе чаще всего ведутся в приземном слое воздуха вдоль побережья Северного Ледовитого океана [20–27]. Полученные в таких работах данные о динамике аэрозольных и газовых примесей на прибрежных территориях позволяют оценить мощности источников и стоков контролируемых примесей. При этом остаются неясными процессы обмена примесями между водной поверхностью все более освобождающегося ото льда океана и атмосферой. Нет сведений о вертикальном распределении примесей, что, как показано при анализе нагревания разных слоев атмосферы, очень важно [28, 29]. Нагревание воздуха может происходить не только в приземном слое воздуха, но и в средней тропосфере. Это затрудняет моделирование климатических процессов и сильно осложняет прогноз изменения окружающей среды.

Вне Российского сектора Арктики для исследования вертикального распределения газовых и аэрозольных примесей широко применяются самолеты-лаборатории [30–32]. Самолетный метод исследования состава воздуха по вертикали сейчас признается эталонным [33], так как позволяет использовать прецизионные приборы и проводить измерения, в том числе основных метеорологических величин, с хорошей привязкой в пространстве и времени.

В Российском секторе Арктики исследование состава воздуха выполнялось только в приземном (придонном) слое воздуха на дрейфующих станциях [34, 35] или с борта научно-исследовательских судов [36–42]. Наконец, в 2010 г. появилась хорошо оснащенная прибрежная международная гидрометеорологическая обсерватория «Тикси» [43], к сожалению, единственная на всем побережье Северного Ледовитого океана, которое в российской юрисдикции имеет протяженность несколько тысяч километров. Авторам настоящей работы в последнее десятилетие удалось провести две небольшие летные кампании в Арктическом секторе России в рамках международных проектов [44, 45].

Для восполнения пробела в данных о вертикальном распределении газового и аэрозольного составов в сентябре 2020 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» был проведен эксперимент по зон-

дированию атмосферы и водной поверхности над акваториями всех морей Северного Ледовитого океана в Российском секторе Арктики: Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. В качестве контрольного по отношению к Арктике было выбрано Берингово море в Тихом океане. Следует отметить, что подобный масштабный эксперимент не выполнялся ни в бывшем СССР, ни в современной России. В работе [46] описаны проведенный эксперимент, характеристики использованного оборудования; приведены средние концентрации примесей над всеми морями. Настоящая работа начинается цикл статей с подробным анализом особенностей распределения состава воздуха над каждым из них.

Начнем наш цикл с рассмотрения метана. Важность изучения динамики этой составляющей воздуха в Арктике в последнее время резко возросла в связи с деградацией многолетней мерзлоты. Факт наличия более высоких концентраций CH_4 над рассматриваемым регионом установлен как в ходе приземных измерений [47, 48], так и во всей толще тропосферы по спутниковым данным [49, 50]. Однако относительно механизмов увеличения концентрации метана мнения расходятся.

Анализ поступления метана непосредственно с водной поверхности океана в атмосферу, выполненный на основании прямых измерений путем численного моделирования, показал, что количества поступившего CH_4 недостаточно для образования наблюдающихся концентраций [51–53].

Дополнительное количество метана может поступать от разложения газогидратов, находящихся на дне океана. Это явление зафиксировано, в частности, в ходе измерений на морских судах группой ДВО РАН под руководством И.П. Семилетова [54–56]. При этом не все согласны со сделанной Семилетовым оценкой масштаба угрозы от разложения газогидратов [57, 58]. Более того, в недавно вышедших работах [59, 60] было установлено, что в районах обнаружения сипов мерзлые породы и газогидраты отсутствуют, а сами сипы обусловлены миграцией газов с больших глубин через имеющиеся разломы.

Ряд исследователей считает, что дополнительное количество метана и других примесей может переноситься на акваторию Северного Ледовитого океана с окружающей его суши [61–64], включая эмиссии от болот, газовых месторождений, пожаров [39–42], причем не только по воздуху. В Арктику поступают воды из более южных океанов, которые несут в себе дополнительное количество микробов и бактерий [65]. Они, в свою очередь, могут дополнительно эмитировать некоторое количество метана в атмосферу [66, 67]. Перенос примесей в Арктику оказался столь значимым, но в то же время и малоизученным, что Германское аэрокосмическое агентство организовало специальную программу HALO-AC, в рамках которой три самолета-лаборатории будут одновременно исследовать этот процесс на разных высотах [68].

Сам перенос возможен и с прибрежных территорий, где в условиях теплеющего климата

интенсивно разлагается многолетняя мерзлота, в которой накоплен огромный запас органического вещества, перерабатываемого анаэробными микробами в метан или углекислый газ [69–71]. Причем запасы органики столь велики, что в [72] они названы «скрытой углеродной бомбой» замедленного действия, которая может «взорваться» при дальнейшем потеплении в регионе.

Помимо выделения метана из почвы, при таянии мерзлоты в Арктике образуются термокарстовые озера, выход метана из которых на порядок интенсивнее, чем из других источников, и может достигать сотен граммов с квадратного метра в год [73–76]. По данным [77], площадь озер на равнинных участках может занимать от 10 до 30% таких территорий. Следовательно, этот источник будет соизмерим по мощности с другими.

Вышедший недавно обзор по бюджету метана в атмосфере [78] хотя и уточняет в целом по планете диапазоны мощности отдельных источников, тем не менее ответа на вопрос о причинах увеличения концентрации CH_4 над Арктикой не дает. Оценки же мощности эмиссии CH_4 того или иного источника, собранные в [79], показывают, что они могут отличаться на три порядка величины. По-видимому, мощность их растет. По данным Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA США), обобщившего данные измерений на 40 участках по всему миру, концентрация метана выросла в 2021 г. больше, чем в любом предыдущем. Это еще раз подчеркивает важность исследования пространственно-временной изменчивости метана в атмосфере [80].

Поскольку в [46] дана полная характеристика проведенного эксперимента, то в данной статье ее повторять ее не будем. Напомним только, что концентрация метана измерялась с помощью газоанализатора G2301-m (Picarro Inc., США), работающего на основе метода спектроскопии внутрирезонаторного затухания сигнала во времени (Cavity Ring-Down Spectroscopy – CRDS). Этот прибор создан специально для применения на самолете-лаборатории и позволяет регистрировать концентрацию CH_4 в диапазоне $0\text{--}20 \text{ млн}^{-1}$ с погрешностью $< \pm 0,0015 \text{ млн}^{-1}$ и частотой 1 Гц. Профили метана восстанавливались по данным ежесекундных измерений путем скользящего среднего по 30 точкам и последующей интерполяции с шагом 10 м по высоте.

Также в [46] было показано, что выше 5000 м различия в концентрации метана над разными морями были небольшими. Поэтому в настоящей работе данные выше 5000 м не приводятся.

1. Вертикальное распределение

1.1. Баренцево море и прибрежные территории

Зондирование атмосферы над Баренцевым морем было выполнено 4.09.2020 г. Оно началось с набора высоты в Архангельске в 12:58 (здесь и далее время по Гринвичу). Затем было произведе-

дено два снижения до 200 м н. у. м. и два набора высоты до 9000 м. Были получены один профиль концентрации CH_4 над сушей и четыре над морем (рис. 1, цв. вкладка). Профили обозначены временем их начала: 13:30, 14:22, 14:52 и 15:38 (море); 12:58 (суша).

Из рис. 1 видно, что максимальные концентрации метана наблюдались в слое перемешивания, приземном или приводном слоях воздуха. Вертикальное распределение концентрации метана в тропосфере в значительной степени определялось структурой пограничного слоя атмосферы (ПСА). Высота этого слоя ($H_{\text{ПСА}}$) оценивалась по изменениям профилей виртуальной потенциальной температуры (θ_v) (данные для расчета которой измерялись синхронно с газовыми компонентами), отношения смеси водяного пара (r) и концентрации атмосферных примесей по методике [81]. Их динамика показана на рис. 2 (цв. вкладка). Видно, что над сушей и большей частью акватории в период эксперимента $H_{\text{ПСА}}$ варьировалась от 1,5 до 2,3 км. Также следует обратить внимание на большой разброс высоты пограничного слоя над разными частями Баренцева моря, места получения профилей можно увидеть на рис. 3, б (цв. вкладка). На отдельных профилях имеются вторичные максимумы в нижней части ПСА. Перепад концентраций между приземным (приводным) слоем и верхней границей ПСА достигал $110\text{--}140 \text{ млрд}^{-1}$.

Такой характер вертикального распределения метана говорит о том, что основной источник этого газа находится на подстилающей поверхности, будь то суша или море. Само вертикальное зондирование атмосферы проводилось после 16:00 местного времени, когда внутренний слой перемешивания уже распался и за счет турбулентного перемешивания примеси начинали распространяться во всем пограничном слое [82]. Выше ПСА наблюдается медленное убывание концентрации метана вплоть до высоты 5000 м. В пользу такого заключения свидетельствуют и профили отношения смеси водяного пара (рис. 2), источником которого является испарение с подстилающей поверхности.

На рис. 1 обращает на себя внимание тот факт, что концентрация CH_4 во всем пограничном слое над сушей была выше, чем над морем. Поскольку, согласно анализу синоптической ситуации, выполненному в [46], перенос воздуха в этот период происходил в северо-восточном направлении, то это может означать, что источник метана на суше был в этот период мощнее, чем на море. Обратные суточные траектории, приведенные на рис. 3, а, также указывают на это. Они построены для угловых точек «условного» треугольника, представляющего маршрут самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» (красная линия на рис. 3, б).

Из рис. 3 видно, что воздух, пришедший в район измерений в ПСА, формировался над сушей. В свободной тропосфере направление переноса с юго-западного сменилось на западное.

Для того чтобы подтвердить, что мощность прибрежных источников была больше, чем морского,

на рис. 2, *e* приведены разности концентраций для всех вертикальных профилей, полученных над морем, относительно профиля, измеренного в районе Архангельска.

На рис. 2, *e* видно, что отрицательная разница в концентрациях CH_4 , достигавшая 95 млрд^{-1} , наблюдается внутри пограничного слоя, вблизи уровня 1000 м. К верхней границе ПСА она уменьшается. На уровне $H_{\text{ПСА}}$ она становится положительной, а в средней тропосфере снова отрицательной. Выше 4000 м различия в концентрациях становятся менее значительными.

Таким образом, можно сделать вывод, что в период эксперимента над Баренцевым морем мощность источника метана на суше была выше, чем над водной поверхностью, т.е. перенос CH_4 осуществлялся с суши.

1.2. Карское море

Состав воздуха над Карским морем измерялся 6.09.2020 г. Зондирование выполнялось по схеме, горизонтальная проекция которой по форме схожа с петлей гистерезиса. Вылет был произведен из аэропорта Нарьян-Мара. Было получено четыре вертикальных профиля концентраций над морем. Результаты измерений представлены на рис. 4 (цв. вкладка). Для сопоставления добавлен профиль, измеренный в районе Нарьян-Мара.

Из рис. 4 видно, что в профилях «11:24» и «12:13» концентрация метана не только в приземном и приводном слоях, но и во всей нижней тропосфере (до 4000 м) больше над морем, чем над сушей. Перепад концентраций между приводным слоем (200 м) и минимальным значением вблизи уровня 3000 м достигал 180 млрд^{-1} . Совершенно не прослеживаются задерживающие свойства верхней границы пограничного слоя, высота которого над сушей была 1,8 км и изменялась над морем от 1,7 до 2,0 км (рис. 5, цв. вкладка).

Такой характер вертикального распределения метана в этом регионе свидетельствует о том, что в Карском море имеется источник CH_4 , который мощнее, чем источники на суше. Это подтверждают данные рис. 6, *a* (цв. вкладка), на котором приведены обратные суточные траектории. Видно, что во все районы Карского моря, где проводилось самолетное зондирование, воздух поступал по юго-западным траекториям с прилегающей суши. Таким образом, к имеющемуся в поступающей воздушной массе метану добавилось определенное его количество, эмитируемое с поверхности моря. Добавка концентрации метана над Карским морем достигала $\sim 80 \text{ млрд}^{-1}$. Вблизи уровня 1000 м наблюдался тонкий слой, в котором его содержание было меньше, чем над материком. В слое 1500–4000 м над удаленными районами Карского моря вновь появляется дополнительное количество метана. Возможно, сказывается неоднородность его эмиссии с поверхности океана. На этом вопросе остановимся несколько позже.

Выше 4000 м и ход концентраций (рис. 5, *a–d*), и ход их разностей (рис. 5, *e*) имеют нейтральный характер.

1.3. Море Лаптевых

Зондирование над морем Лаптевых проводилось 9.09.2020 г. по сложившейся уже схеме условного треугольника из аэропорта Тикси. Данные представлены на рис. 7 (цв. вкладка).

Показано, что концентрация метана в этом районе заметно ниже, чем в предыдущих. Это свидетельствует о меньшей мощности источников CH_4 в прилегающей местности и на самой акватории моря. При этом содержание метана над морем выше, чем над сушей, как в приземном (приводном) слое, так и в нижней тропосфере в целом. Уменьшился также и перепад концентраций между приводным слоем и нижней тропосферой — здесь он менее 100 млрд^{-1} .

Характер вертикального распределения концентрации метана по анализируемой территории заметно меняется. Он зависит от высоты слоя перемешивания, которая изменялась от 200 до 700 м (рис. 8, цв. вкладка). Соответственно изменению высоты видны вторичные максимумы концентрации в остаточном слое ПСА. Такая ситуация сложилась из-за особенностей переноса воздуха в исследуемый район. На акваторию моря Лаптевых воздух поступал из западных районов Северного Ледовитого океана, а в Тикси, наоборот, из континентальных областей. В этом случае трудно предположить связь между концентрациями метана на суше и море. Поэтому сравнение «суша–море» в этом разделе не приводится.

1.4. Восточно-Сибирское море

Ввиду того, что аэропорт Певек был закрыт на ремонт, зондирование атмосферы над Восточно-Сибирским и Чукотским морями производилось из аэропорта Анадырь. В этом случае полет и отлет от места зондирования занимал достаточно много времени и сокращал время основной работы. В итоге уменьшилась площадь анализируемой территории. Тем не менее удалось выявить особенности распределения метана над указанными морями (рис. 9 и 10, цв. вкладка).

Из рис. 9 видно, что вертикальное распределение метана над Восточно-Сибирским морем в целом соответствует предыдущим профилям. Наибольшие концентрации наблюдаются в приводном (приземном) слое воздуха, затем — падение концентрации с высотой до уровня 2500 м. Выше ход был близок к нейтральному. В отличие от распределения над западными морями здесь переход к нейтральному ходу происходит значительно ниже. Над западными морями он наблюдался вблизи и выше 4000 м. Очевидно, что это различие обусловлено низкой высотой слоя перемешивания, которая в четырех из пяти полученных профилей не превышала

1000 м (рис. 10). Существенно уменьшился и перепад концентраций между приводным слоем и нижней тропосферой — всего 84 млрд⁻¹. Можно также отметить меньший разброс концентраций между отдельными профилями на всех высотах. Это говорит об однородности источника метана в воздушной массе, поступающей на акваторию моря.

Такое вертикальное распределение объясняется предысторией воздушной массы, наблюдавшейся в районе проведения эксперимента. Из рис. 10, *e* следует, что в приводном и пограничном слоях воздух поступал из Западного полушария, с поверхности Северного Ледовитого океана вдоль береговой линии Аляски. В свободной тропосфере перенос осуществлялся также с акватории Северного Ледовитого океана. Поскольку измерений в тех районах не проводилось, то сопоставление провести невозможно.

1.5. Чукотское море

В силу синоптических условий зондирование атмосферы над Чукотским морем проводилось 14–15.09.2020 г., на день раньше, чем над Восточно-Сибирским. Данные измерений представлены на рис. 11 (цв. вкладка).

Из сравнения рис. 7 и 11 видно, что характер вертикального распределения и концентрации метана над Чукотским морем близки к наблюдавшимся над Восточно-Сибирским. Правда, над Чукотским морем переход к нейтральному изменению концентрации с высотой оказался еще ниже, вблизи уровня 1800 м. При этом слой перемешивания здесь располагался заметно ниже, на высоте не более 600 м (рис. 12, цв. вкладка).

Концентрация CH₄ в пограничном слое над морем была выше, чем над материковой поверхностью. Такое сопоставление в данном случае условное, поскольку между Чукотским морем и Анадырем достаточно гористая местность, экранирующая перенос воздушных масс. Максимальный перепад концентраций — 85 млрд⁻¹.

Воздух на акваторию Чукотского моря поступал в пограничном слое через Тихий океан с территории Аляски (рис. 12, *e*). Для свободной атмосферы источником поступления был Тихий океан, но минуя Аляску.

1.6. Берингово море

Первоначально зондирование над Беринговым морем не планировалось. Однако особенности распределения метана над Восточно-Сибирским и Чукотским морями обусловили необходимость проведения контрольного полета. Это было вызвано тем, что между западными и восточными морями были зафиксированы большие различия в концентрации метана в приводном слое воздуха. Измерения были выполнены 16.09.2020 г., во второй половине дня. Вылет из аэропорта Анадыря осуществлялся сразу в сторону Берингова моря на небольшой высоте.

На рис. 8, *d* приведен профиль, полученный в районе Анадыря двумя часами ранее, при возвращении с акватории Восточно-Сибирского моря.

Данные рис. 13 (цв. вкладка) подтверждают результаты измерений над Восточно-Сибирским и Чукотским морями как по концентрациям метана, так и по границе перехода к нейтральному изменению с высотой. Такими же в среднем остались и перепады концентраций между приводным слоем и нижней тропосферой: 83 млрд⁻¹. Если высота слоя перемешивания над Беринговым морем была близка к той, что наблюдалась над Восточно-Сибирским и Чукотским морями, то высота пограничного слоя увеличилась по сравнению с Чукотским морем (рис. 14, цв. вкладка).

В отличие от профилей над рассмотренными ранее морями профили на рис. 13 мало различаются между собой над разными участками Берингова моря в ПСА. Различия в основном наблюдаются выше $H_{\text{ПСА}}$. Это связано с особенностями переноса воздуха на этих высотах. Рис. 14, *e* показывает, что траектории поступления воздуха были аналогичны наблюдавшимся над Чукотским морем. Это и обусловило заметный разброс между концентрациями метана в свободной тропосфере.

2. Горизонтальные неоднородности в распределении метана

В ходе эксперимента помимо вертикального зондирования выполнялись и горизонтальные полеты на высотах 200, 5000 и 9000 м над разными участками акваторий морей. Во время таких полетов регистрировались концентрации малых газовых составляющих с частотой 1 Гц. Эти данные позволяют оценить изменчивость концентрации метана над разными участками каждого моря. Участки, на которых были проведены измерения на высоте 200 м, представлены на рис. 15 (цв. вкладка). Мы полагали, что на этой высоте должны найти отражение неоднородности эмиссии CH₄ с поверхности океана. Результаты измерений для сопоставления изменений концентрации над разными морями приведены на рис. 16 (цв. вкладка).

С одной стороны, рис. 16 отражает различия в концентрациях метана над разными морями, отмеченные в предыдущем разделе. С другой стороны, он показывает особенности их горизонтального распределения над акваториями. Видно, что изменчивость концентрации CH₄ наибольшая над морем Лаптевых, до 73 млрд⁻¹ на трех участках общей протяженностью около 250 км. Над Баренцевым и Карским морями она превышает 30 млрд⁻¹. Наименьшие вариации концентрации по горизонтали зафиксированы над Восточно-Сибирским и Беринговым морями. Сейчас сложно комментировать эти данные. Возможно, это обусловлено геологической структурой дна морей, о которой сообщалось в [59, 60]. Так, над Баренцевым морем четко видно пять мезомасштабных структур, по-видимому,

отражающих поступление метана с поверхности океана. Колебания концентрации CH_4 , но с меньшими периодами проявляются и над Карским морем. Возможно, такая большая изменчивость в море Лаптевых обусловлена наличием здесь сипов метана, описанных в [54–56].

3. Обсуждение результатов

Измеренные в настоящем эксперименте вертикальные профили концентрации CH_4 хорошо согласуются по характеру с данными в других секторах Арктики, полученными зарубежными коллегами [83, 84]. Сопоставление по абсолютным значениям неравномерно, так как у концентрации метана имеется многолетний тренд, и наши данные не совпадают с опубликованными по времени.

Для сопоставления содержания метана в приводном слое над разными морями была составлена табл. 1.

Данные таблицы показывают, что в период эксперимента средняя по всем измерениям концентрация метана на высоте 200 м была наибольшей над Карским морем – 2091 млрд⁻¹, наименьшей над Чукотским – 2005 млрд⁻¹. Средние значения концентрации CH_4 характерны для Баренцева (2030 млрд⁻¹) и моря Лаптевых (2022 млрд⁻¹). Концентрации метана над морем Лаптевых в Восточно-Сибирском море (2015 млрд⁻¹) отличались незначительно. Полученные оценки частично подтверждаются результатами работ [85–87], в которых выявлены повышенные концентрации метана над Баренцевым и Карским морями.

Перепад концентраций между уровнем 200 м и свободной тропосферой достигал 180 млрд⁻¹ над Карским морем, уменьшился до 140 и 94 млрд⁻¹ над Баренцевым и морем Лаптевых и еще более снизился над Восточно-Сибирским, Чукотским и Беринговым морями: до 84, 85 и 83 млрд⁻¹ соответственно. Это отражает эмиссионные характеристики морей. Частичным подтверждением наших данных могут служить результаты измерения потоков метана в приводном слое, выполненные авторами [88],

где показано, что ежегодные морские потоки метана составляют в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском 0,83; 0,62 и 0,03 Тг/год соответственно.

При этом перепад концентраций мало зависит от высоты пограничного слоя, температуры воды и воздуха (см. табл. 1). Возможно, для внутреннего перемешивания над морем требуется больше времени [82], чем над сушей, поэтому над сушей метан быстрее проникает в свободную тропосферу.

Во многих работах (например, [89–93]) утверждается, что прибрежные территории выделяют больше метана, чем океан. В данном случае речь не идет о катастрофических процессах [94, 95]. Источником метана на суше, вероятно, выступают термокарстовые озера, в изобилии образовавшиеся в прибрежной тундре. Из вышеприведенных данных следует, что возможны случаи, когда концентрация CH_4 выше над сушей, чем над морем, и наоборот. Здесь следует подчеркнуть, что полеты над морями выполнялись в дневное время, когда внутренний слой перемешивания отсутствовал и процессы накопления примесей не наблюдались. Над сушей же они могут вносить существенный вклад. Чтобы оценить возможную мощность источников, рассмотрим табл. 2, в которой собраны максимальные концентрации метана над морями и прибрежными территориями в период эксперимента.

Из данных табл. 2 следует, что максимальные концентрации метана, наблюдавшиеся в период эксперимента, были выше над прибрежными территориями, чем над морскими. Это происходит потому, что при наличии местных источников в ночное время происходит накопление CH_4 во внутреннем слое перемешивания. В первой половине дня, когда внутренний слой перемешивания разрушается [82], происходит рассеивание газа по всему ПСА. Это легко увидеть на примере профилей CH_4 на рис. 17 (цв. вкладка). За 10 ч, прошедших между двумя зондированиями, концентрация метана во внутреннем слое перемешивания (0–500 м) возросла с 2065 до 2200 млрд⁻¹, т.е. на 135 млрд⁻¹. Выше 500 м содержание CH_4 варьировало в значительно меньших

Таблица 1

Средние характеристики распределения метана и его изменчивости и условия измерения

Параметр	Море					
	Баренцево	Карское	Лаптевых	Восточно-Сибирское	Чукотское	Берингово
Концентрация CH_4 на высоте 200 м, млрд ⁻¹	2030 ± 11	2091 ± 6	2022 ± 16	2015 ± 2	2005 ± 13	2012 ± 3
Высота пограничного слоя, км	1,9 ± 0,5	1,8 ± 0,1	1,6 ± 0,3	1,8 ± 0,5	1,3 ± 0,3	1,7 ± 0,2
Перепад концентраций между 200 м и свободной тропосферой, млрд ⁻¹	140	180	94	84	85	83
Температура воздуха на высоте 200 м, °С	14,7 ± 1,9	12,1 ± 0,6	7,2 ± 1,7	3,6 ± 0,4	5,0 ± 0,4	6,9 ± 0,3
Температура моря (прибрежные станции), °С	11	8	7	5	4	8
Диапазон изменения концентрации на высоте 200 м на горизонтальных участках, млрд ⁻¹	32	36	73	10	23	13

Таблица 2

**Максимальные концентрации метана над морями
и прибрежными районами, млрд⁻¹**

Море	CH ₄	Берег	CH ₄
Баренцево	2046	Архангельск	2092
Карское	2104	Нарьян-Мар	2203
Лаптевых	2054	Тикси	2061
Восточно-Сибирское	2020	Анадырь	2038
Чукотское	2021	Анадырь	2038
Берингово	2018	Анадырь	2038

пределах. Обычно скорость передвижения воздушных масс составляет 30–50 км/ч [96]. Следовательно, за 10 ч перенос мог быть на 300–500 км. Отсюда совершенно очевидно, что рост концентрации метана произошел из-за эмиссии от местных источников, расположенных вблизи района измерений. Если же общий перенос будет направлен в сторону океана, то дополнительно поступившее количество метана будет перенесено туда.

Заключение

Анализ вертикального распределения метана над всеми арктическими морями показал, что его максимальные концентрации во время эксперимента наблюдались в приземном или приводном слое воздуха. На отдельных профилях имеются вторичные максимумы в нижней части ПСА. Перепад концентраций между уровнем 200 м и свободной тропосферой достигал 180 млрд⁻¹ над Карским морем и уменьшался над Восточно-Сибирским, Чукотским и Беринговым морями до 84, 85 и 83 млрд⁻¹ соответственно. Такой характер вертикального распределения метана говорит о том, что основной источник этого газа находится на подстилающей поверхности, будь то суша или море, и отражает эмиссионные характеристики морей. Выше верхней границы пограничного слоя наблюдается постепенное убывание концентрации метана вплоть до высоты 5000 м.

Сопоставление содержания метана над всеми морями показало, что наибольшая концентрация метана на высоте 200 м была над Карским морем, наименьшая – над Чукотским. Незначительно отличались от Чукотского акватории Восточно-Сибирского и Берингова морей. Баренцево и море Лаптевых занимают промежуточное положение. Такое различие в распределении метана в этом регионе свидетельствует о том, что в Карском море, вероятно, имеется источник CH₄, который мощнее остальных. При этом перепад концентраций мало зависит от высоты пограничного слоя, температуры воды и воздуха.

Сопоставление данных о концентрации метана над морем и сушей на одной и той же высоте выявило, что в районе Баренцева моря концентрация была выше над прибрежной территорией, чем над морем. По мере удаления от берега она уменьшалась. В окрестностях Карского моря, наоборот, был заметен рост по мере удаления от берега. Разница содержания CH₄ «суша–море» в районе моря Лап-

тевых была нулевой. Оценка такой же разницы, проведенная для остальных морей по отношению к данным Анадыря, показала небольшое превышение концентраций метана над сушей. Сравнение максимальных концентраций метана, зафиксированных в период эксперимента над морями и сопредельными материковыми территориями, выявило, что они везде были больше над сушей.

Учитывая то обстоятельство, что эксперимент был локальным по времени, надо подчеркнуть, что на основе полученных результатов невозможно сделать окончательные выводы ни о положении источников метана на рассмотренной территории, ни об их интенсивности. Необходим дальнейший регулярный и системный мониторинг атмосферного метана (и других парниковых газов).

Финансирование. Зондирование атмосферы выполнено на УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»», созданного в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Обработка данных и анализ результатов проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ «Исследование антропогенных и естественных факторов изменений состава воздуха и объектов окружающей среды в Сибири и Российском секторе Арктики в условиях быстрых изменений климата с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»» (соглашение № 075-15-2021-934).

Список литературы

1. *McNutt M.* Times's up, CO₂ // *Science*. 2019. V. 365, N 6432. P. 411.
2. *George S.S.* Aberrant synchrony of present-day warming // *Nature*. 2019. V. 571, N 7766. P. 481–482.
3. *Neukom R., Steiger N., Gytmez-Navarro J.J., Wang J., Werner J.P.* No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era // *Nature*. 2019. V. 571, N 7766. P. 550–554.
4. *Shepherd T.G.* Effects of a warming Arctic // *Science*. 2016. V. 353, N 6303. P. 989–990.
5. *Najafi M.R., Zwiers F.W., Gillett N.P.* Attribution of Arctic temperature change to greenhouse-gas and aerosol influences // *Nat. Clim. Change*. 2015. N 2. 4 p.
6. *Семенов В.А.* Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2021. Т. 57, № 1. С. 21–33.
7. *Клепиков А.В., Данилов А.И.* Полярная метеорология (Результаты Российских исследований в 2015–2018 гг.) // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2021. Т. 57, № 3. С. 261–267.
8. *Travnik L.* Carbon cycling in the Arctic // *Science*. 2014. V. 345, N 6199. P. 870.
9. *Cory R.M., Ward C.P., Crump B.C., Kling G.W.* Sunlight controls water column processing of carbon in Arctic fresh waters // *Science*. 2014. V. 345, N 6199. P. 925–928.
10. *Sand M., Berntsen T.K., von Salzen K., Flanner M.G., Langner J., Victor D.G.* Response of Arctic temperature to changes in emissions of short-lived climate forcers // *Nat. Clim. Change*. 2015. N 11. 4 p.
11. *Nomura D., Granskog M.A., Fransson A., Chierici M., Silyakova A., Ohshima K.I., Cohen L., Delille B., Hudson S.R., Dieckmann G.S.* CO₂ flux over young and

- snow-covered Arctic pack ice in winter and spring // *Biogeosci.* 2018. V. 15, N 11. P. 3331–3343.
12. Yasunaka S., Murata A., Watanabe E., Chierici M., Fransson A., van Heuven S., Hoppema M., Ishii M., Johannessen T., Kosugi N., Lauvset S.K., Mathis J.T., Nishino S., Omar A.M., Olsen A., Sasano D., Takahashi T., Wanninkhof R. Mapping of the air–sea CO₂ flux in the Arctic Ocean and its adjacent seas: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability // *Polar Sci.* 2016. N 3. P. 323–334.
 13. Willis M.D., Leaitch R.W., Abbatt J.P.D. Processes controlling the composition and abundance of Arctic aerosol // *Rev. Geophys.* 2018. V. 56, N 4. P. 621–671.
 14. Arnold S.R., Law K.S., Brock C.A., Thomas J.L., Starckweather S.M., Salzen K., Stohl A., Sharma S., Lund M.T., Flanner M.G., Petaja T., Tanimoto H., Gamble J., Dibb J.E., Melamed M., Johnson N., Fider M., Tynkkynen V.-P., Baklanov A., Eckhardt S., Monks S.A., Browse J., Bozem H. Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade // *ELEMENTA: Sci. Atmos.* 2016. N 4. 16 p.
 15. Law K.S., Stohl A., Quinn P.K., Brock C.A., Burkhardt J.F., Paris J.D., Ancellet G., Singh B., Roiger A., Schlager H. Arctic air pollution // *BAMS.* 2014. V. 95, N 12. P. 1873–1895.
 16. Roiger A., Thomas J.-L., Schlager H., Law K.S., Kim J., Schafner A., Weinzierl B., Dahlkötter F., Krisch I., Marelle L., Minikin A., Raut J.-C., Reiter A., Rose M., Scheibe M., Stock P., Baumann R., Clerbaux C., George M., Onishi T., Flemming J. Quantifying emerging local anthropogenic emissions in the Arctic region // *BAMS.* 2015. V. 96, N 3. P. 441–460.
 17. Evangelidou N., Balkanski Y., Hao W.M., Petkov A., Silverstein R.P., Corley R., Nordgren B., Urbanski S.P., Eckhardt S., Stohl A., Tunved P., Crepinsek S., Jefferson A., Sharma S., Njgaard J.K., Skov H. Wildfires in northern Eurasia affect the budget of black carbon in the Arctic – a 12-year retrospective synopsis (2002–2013) // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 12. P. 7587–7604.
 18. Kulmala M., Nieminen T., Chellapermal R., Makkonen R., Back J., Kerminen V.-M. Climate feedbacks linking the increasing atmospheric CO₂ concentration, BVOC emissions, aerosols and clouds in forest ecosystems / U. Niinemets, R.K. Monson (eds.) // *Biology, Controls and Model Tree Volatile Organic Compound Emissions.* Dordrecht: Springer, 2010. P. 489–508.
 19. Schmale J., Arnold S.R., Law K.S., Thorp T., Anenberg S., Simpson W.R., Mao J., Pratt K.A. Local Arctic air pollution: A neglected but serious problem // *Earth's Future.* 2018. N 6. DOI: 10.1029/2018EF000952.
 20. Willis M.D., Burkart J., Thomas J.L., Kollner F., Schneider J., Bozem H., Hoor P.M., Aliabadi A.A., Schulz H., Herber A.B., Leaitch W.R., Abbatt J.D. Growth of nucleation mode particles in the summertime Arctic: A case study // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 12. P. 763–767.
 21. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivaikhov V., Makhtas A. Aerosol size distribution seasonal characteristics // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 13. P. 1271–1287.
 22. Cassidy A.E., Christen A., Henry Y.R. The effect of a permafrost disturbance on growing-season carbon-dioxide fluxes in high Arctic tundra ecosystem // *Biogeosci.* 2016. V. 13, N 8. P. 2291–2303.
 23. Strachan I.B., Nugent R.A., Crombie S., Bonneville M.C. Carbon dioxide and methane exchange at a cool temperate freshwater marsh // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10, N 10. 10 p.
 24. Fisher J.B., Sikka M., Oechel W.C., Huntzinger D.N., Melton J.R., Koven C.D., Ahlstrom A., Arian M.A., Baker I., Chen J.M., Ciais P., Davidson C., Dietze M., El-Marsi B., Hayes D., Huntingford C., Jain A.K., Levy P.E., Lomas M.R., Poulter B., Price D., Sahoo A.K., Schaefer K., Tian H., Tomelleri E., Verbeeck H., Viovy N., Wania R., Zeng N., Miller C.E. Carbon cycle uncertainty in the Alaskan Arctic // *Biogeosci.* 2014. V. 11, N 15. P. 4271–4288.
 25. Langer M., Westermann S., Anthony K.W., Wischnewski K., Boike J. Frozen ponds: Production and storage of methane during the Arctic winter in a lowland tundra landscape in northern Siberia, Lena // *Biogeosci.* 2015. V. 12, N 4. P. 977–990.
 26. Giamarelou M., Eleftheriadis K., Nyeki S., Torseth K., Biskos G. Indirect evidence of the composition of nucleation mode atmospheric particles in the high Arctic // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121, N 2. P. 965–975.
 27. Myhre C.L., Ferre B., Platt M., Silyakova A., Hermansen O., Allen G., Pisso I., Schmidbauer N., Stohl A., Pitt J., Jansson P., Greinert J., Percival C., Fjærraa A.M., O'Shea S.J., Gallagher M., Breton M.L., Bower K.N., Bauguitte S.J.B., Dalsoren S., Vadakkepullyambatta S., Fisher R.E., Nisbet E.G., Lowry D., Myhre G., Pyle J.A., Cain M., Mienert J. Extensive release of methane from Arctic seabed west of Svalbard during summer 2014 // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, N 9. P. 4624–4631.
 28. Kylling A., Zwaafink G.C.D., Stohl A. Mineral dust instantaneous radiative forcing in the Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45, N 9. P. 4290–4298.
 29. Журавлева Т.Б., Панченко М.В., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Модельные оценки динамики вертикальной структуры поглощения солнечного излучения и температурных эффектов в фоновых условиях и экстремально задымленной атмосфере по данным самолетных наблюдений // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 10. С. 834–839; Zhuravleva T.B., Panchenko M.V., Kozlov V.S., Nasrtdinov I.M., Pol'kin V.V., Terpugova S.A., Chernov D.G. Model estimates of dynamics of the vertical structure of solar absorption and temperature effects under background conditions and in extremely smoke-laden atmosphere according to data of aircraft observations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 24–30.
 30. France J.L., Cain M., Fisher R.E., Lowry D., Allen G., Shea S.J.O., Hingworth S., Pyle J., Warwick N., Jones B.T., Gallagher M.W., Bower K., Breton M.L., Percival C., Muller J., Wellpott A., Bauguitte S., George C., Hayman G.D., Manning A.J., Myhre C.L., Lanoiselle M., Nisbet E.G. Measurements of $\delta^{13}\text{C}$ in CH₄ and using particle dispersion modeling to characterize sources of Arctic methane within an air mass // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016, V. 121, N 23. P. 14257–14270.
 31. Quenmehen B., Schwarzenboeck A., Schmale J., Schneider J., Sodemann H., Stohl A., Ancellet G., Crumeyrolle S., Law K.S. Physical properties of pollution aerosol particles transported from North America to Greenland as measured during the POLARCAT summer campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 21. P. 10947–10963.
 32. Leaitch W.R., Korolev A., Aliabadi A.A., Burkart J., Willis M.D., Abbatt J.P.D., Bozem H., Hoor P.,

- Kollner F., Scchneider J., Herber A., Konrad C., Brauner R.* Effects of 20–100 nm particles on liquid clouds in the clean summertime Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 17. P. 11107–11124.
33. *Airborne Measurements for Environmental Research* / M. Wendisch, J.-L. Brenguier (ed.). Weinheim: Wiley-VCH, 2013. 655 p.
34. *Нагурный А.П.* Анализ данных измерений концентрации диоксида углерода в приледном слое атмосферы на ледовой дрейфующей станции «Северный Полюс-35» (2007–2008 гг.) // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 9. С. 55–61.
35. *Нагурный А.П., Макутас А.П.* Концентрация метана в пограничном слое атмосферы по данным измерений на дрейфующих ледовых станциях «Северный полюс-36» и «Северный полюс-39» // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 3. С. 63–71.
36. *Пупко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П.* Динамика CO₂ на шельфе Восточно-Сибирского моря // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 9. С. 62–73.
37. *Semiletov I.P., Shakhova N.E., Pipko I.I., Pugach S.P., Charkin A.N., Dudarev O.V., Kosmach D.A., Nishino S.* Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay and adjacent part of Laptev Sea // *Biogeosci.* 2013. V. 10, N 9. P. 5977–5996.
38. *Yu J., Xie Z., Sun L., Kang H., He P., Xing G.* δ¹³C-CH₄ reveals CH₄ variations over oceans from mid-latitudes to the Arctic // *Sci. Report.* 2015. V. 5, N 13760. 9 p.
39. *Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I., Belousov V., Muravya V., Flint M.* Ship-borne observations of atmospheric CH₄ and ¹³C isotope signature in methane over Arctic Seas in summer and autumn 2021 // *Atmosphere.* 2022. V. 13, N 3. P. 458.
40. *Pankratova N.V., Belikov I.B., Belousov V.A., Kopeikin V.M., Skorokhod A.I., Shtabkin Yu.A., Malafeyev G.V., Flint M.V.* Concentration and isotopic composition of methane, associated gases, and black carbon over Russian Arctic seas (shipborne measurements) // *Oceanology.* 2020. V. 60. P. 593–602.
41. *Skorokhod A.I., Pankratova N.V., Belikov I.B., Thompson R.L., Novigatsky A.N., Golitsyn G.S.* Atmospheric methane and its isotopic composition over seas of the Russian Arctic according to results of ship measurements in summer and autumn of 2015 // *Dokl. Earth Sci.* 2016. V. 470, N 5. P. 580–584.
42. *Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I., Elansky N., Rakitin V., Shtabkin Y., Berezina E.* Evidence of atmospheric response to methane emissions from the East Siberian Arctic shelf // *Geography, Environ., Sustain.* 2018. V. 11, N 1. P. 85–92.
43. *Решетников А.И., Макутас А.П.* Арктическая гидрометеорологическая обсерватория «Тикси» // *Тр. ГГО.* 2012. Вып. 567. С. 267–283.
44. *Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Нэдэлек Ф., Париж Ж.-Д., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В.* Крупномасштабные исследования газового и аэрозольного состава воздуха над Сибирским регионом // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 3. С. 232–239.
45. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В.* Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над Российским сектором Арктики // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Nedelec Ph., Paris J.-D., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* The vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
46. *Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov G.A., Kotelnikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhailchishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopko O.V., Ol'kin S.E., Panchenko M.V., Paris J.-D., Penner I.E., Ptashnik I.V., Rasskazchikova T.M., Reznikova I.K., Romanovskii O.A., Safatov A.S., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Yakovlev S.V., Zenkova P.N.* Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15, N 13. P. 3941–3967.
47. *Ивахов В.М., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Кароль И.Л., Киселев А.А., Зинченко А.В., Семенец Е.С., Полищук В.Ю.* Наблюдения атмосферной концентрации и потоков метана на станции Новый Порт (полуостров Ямал) // *Тр. ГГО.* 2020. Вып. 596. С. 78–95.
48. *Поддубный В.А., Наговицына Е.С., Маркелов Ю.И., Бувечи А.Г., Антонов К.Л., Омелькова Е.В., Манжуров И.Л.* Оценка пространственного распределения концентрации метана в районе Баренцева и Карского морей в летний период 2016–2017 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 3. С. 77–86.
49. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Аномалии содержания метана в атмосфере над Севером Евразии летом 2016 года // *Докл. АН.* 2018. Т. 480, № 2. С. 223–228.
50. *Богоявленский В.И., Сизов О.С., Никонов Р.А., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н.* Дегазация земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // *Арктика: экология и экономика.* 2020. Т. 39, № 3. С. 6–21.
51. *Berchet A., Bousquet P., Pison I., Locatelli R., Chevallier F., Paris J.-D., Dlugokencky E.J., Laurila T., Hatakka J., Viisanen Y., Worthy D.E.J., Nisbet E., Fisher R., France J., Lowry D., Ivakhov V., Hermansen O.* Atmospheric constraints on the methane emissions from the East Siberian Shelf // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 6. P. 4147–4157.
52. *Li Y., Fichot C.G., Geng L., Scarratt M.G., Xie H.* The contribution of methane photoproduction to the oceanic methane paradox // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47, N 14. P. e2020GL088362. DOI: 10.1029/2020GL088362.
53. *Berchet A., Pison I., Crill P.M., Thornton B., Bousquet Ph., Thonat T., Hocking T., Thanwerdas J., Paris J.-D., Saunio M.* Using ship-borne observations of methane isotopic ratio in the Arctic Ocean to understand methane sources in the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 6. P. 3987–3998.
54. *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O.* The East Siberian Arctic Shelf: Towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Philos. T. Roy. Soc. A.* 2015. V. 373. P. 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
55. *Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I.P., Jansen J., Szidat S., Kosmach D., Dudarev O., van der Veen C.,*

- Egger M., Sergienko V., Salyuk A., Tumskoy V., Tison J.-L., Röckmann T.* The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis // *Biogeosci.* 2017. V. 14, N 9. P. 2283–2292.
56. *Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö.* Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. V. 327, N 5970. P. 1246–1250.
57. *You K., Flemings P.B., Malinverno A., Collett T.S., Darnell K.* Mechanisms of methane hydrate formation in geological systems // *Rev. Geophys.* 2019. V. 57, N 4. P. 1146–1196.
58. *Nisbet E.G., Fisher R.E., Lowry D., France J.L., Allen G., Bakkaloglu S., Broderick T.J., Cain M., Coleman M., Fernandez J., Forster G., Griffiths P.T., Iverach C.P., Kelly B.F.J., Manning M.R., Nisbet-Jones P.B.R., Pyle J.A., Townsend-Small A., al-Shalaa A., Warwick N., Zazzeri G.* Methane mitigation: Methods to reduce emissions, on the path to the Paris agreement // *Rev. Geophys.* 2020. V. 58, N 1. P. e2019RG000675.
59. *Богоявленский В.И., Казанин А.Г., Кушанков А.В., Казанин Г.А.* Дегазация земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11, № 2. С. 178–193.
60. *Богоявленский В.И., Кушанков А.В., Казанин А.Г., Казанин Г.А.* Опасные газонасыщенные объекты на акваториях мирового океана: Восточно-Сибирское море // *Арктика: экология и экономика*. 2022. Т. 12, № 2. С. 158–171.
61. *Law K.S., Stohl A.* Arctic Air Pollution: Origins and Impacts // *Science*. 2007. V. 315, N 5818. P. 1537–1540.
62. *Bozem H., Hoor P., Kunkel D., Köllner F., Schneider J., Herber A., Schulz H., Leitch W.R., Aliabadi A.A., Willis M.D., Burkart J., Abbatt J.P.D.* Characterization of transport regimes and the polar dome during Arctic spring and summer using in situ aircraft measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19, N 23. P. 15049–15071.
63. *Макоско А.А., Матешева А.В.* Оценка тенденций дальнего загрязнения атмосферы Арктической зоны России в 1980–2050 гг. с учетом сценариев изменения климата // *Арктика: экология и экономика*. 2020. № 1. С. 45–52.
64. *Макоско А.А., Матешева А.В.* К оценке экологических рисков от загрязнения атмосферы Арктической зоны в условиях изменяющегося климата в XXI в. // *Арктика: экология и экономика*. 2022. Т. 12, № 1. С. 34–45.
65. *Алексеев Г.В., Вязилова А.Е., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Хараланенкова Н.Е.* Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 3. С. 73–82.
66. *Babin M.* Climate change tweaks Arctic marine ecosystems // *Science*. 2020. V. 369, N 6500. P. 137–138.
67. *Lewis K.M., van Dijken G.L., Arrigo K.R.* Changes in phytoplankton concentration now drive increased Arctic Ocean primary production // *Science*. 2020. V. 369, N 6500. P. 198–202.
68. *Wendisch M.D., Handorf D., Tegen I., Neggers R.A.J., Spreen G.* Glimpsing the ins and outs of the Arctic atmosphere cauldron // *Eos*. 2021. N 102. P. EO155959.
69. *Marushchak M.E., Friborg T., Biasi C., Herbst M., Johansson T., Kiepe I., Liimatainen M., Lind S.E., Martikainen P.J., Virtanen T., Soegaard H., Shurpali N.J.* Methane dynamics in the subarctic tundra: Combining stable isotope analyses, plot- and ecosystem-scale flux measurements // *Biogeosci.* 2016. V. 13, N 2. P. 597–608.
70. *Elder C.D., Thompson D.R., Thorpe A.K., Hanke P., Walter A.K.M., Mille C.E.* Airborne mapping reveals emergent power law of Arctic methane emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47, N 3. P. e2019GL085707.
71. *Анисимов О.А., Зимов С.А., Володин Е.М., Лаэров С.А.* Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 5. С. 131–143.
72. *Brouillette M.* The buried carbon bomb // *Nature*. 2021. V. 591, N 7850. P. 360–362.
73. *Jammet M., Crill P., Dengel S., Friborg T.* Large methane emissions from a subarctic lake during spring thaw: Mechanisms and landscape significance // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2015. V. 120. P. 2289–2305.
74. *Tan Z., Zhuang Q., Henze D.K., Frankenberg Ch., Dlugokencky E., Sweeney C., Turner A.J., Sasakawa M., Machida T.* Inverse modeling of pan-Arctic methane emissions at high spatial resolution: What can we learn from assimilating satellite retrievals and using different process-based wetland and lake biogeochemical models? // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 19. P. 12649–12666.
75. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В.* Дегазация земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 2. С. 31–46.
76. *Голубятников Л.Л., Казанцев В.С.* Вклад тундровых озер Западной Сибири в метановый бюджет атмосферы // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2013. Т. 49, № 4. С. 430–438.
77. *Walter A.K.M., Zimov S.A., Grosse G., Jones M.C., Anthony P.N., Chapin F.S., Finlay J.C., Mack M.C., Davydov S., Frenzel P., Frohking S.* A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch // *Nature*. 2014. V. 511, N 7510. P. 452–456.
78. *Saunio M., Stavert A.R., Poulter B., Bousquet Ph., Canadell J.G., Jackson R.B., Raymond P.A., Dlugokencky E.J., Houweling S., Patra P.K., Ciais Ph., Arora V.K., Bastviken D., Bergamaschi P., Blake D.R., Brajlsford G., Bruhwiler L., Carlson K.M., Carrol M., Castaldi S., Chandra N., Crevoisier C., Crill P.M., Covey K., Curry Ch.L., Etiope G., Frankenberg Ch., Gedney N., Hegglin M.I., Höglund-Isaksson L., Hugelius G., Ishizawa M., Ito A., Janssens-Maenhout G., Jensen K.M., Joos F., Kleinen T., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Laruelle G.G., Liu L., Machida T., Maksyutov Sh., McDonald K.C., McNorton J., Miller P.A., Melton J.R., Morino I., Müller J., Murguía-Flores F., Naik V., Niwa Y., Noce S., O'Doherty S., Parker R.J., Peng Ch., Peng Sh., Peters G.P., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Regnier P., Riley W.J., Rosentreter J.A., Segers A., Simpson I.J., Shi H., Smith S.J., Steele L.P., Brett F., Thornton B.F., Tian H., Tohjima Y., Tubiello F.N., Tsuruta A., Viovy N., Voulgarakis A., Weber T.S., van Weele M., van der Werf G.R., Weiss R.F., Worthy D., Wunch D., Yin Y., Yoshida Y., Zhang W., Zhang Z., Zhao Y., Zheng B., Zhu Q., Zhu Q., Qianlai Zhuang Q.* The global methane budget 2000–2017 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. V. 12, N 3. P. 1561–1623.
79. *Kuhn M.A., Varner R.K., Bastviken D., Crill P., MacIntyre S., Turetsky M., Anthony K.W., McGuire A.D., Olefeldt D.* BAWLD-CH₄: A comprehensive dataset

- of methane fluxes from boreal and Arctic ecosystems // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V. 13, N 11. P. 5151–5189.
80. *Duncombe J.* A climate mystery warns us to heed the unknown // *Eos*. 2022. N 103. DOI: 10.1029/2022EO220182.
 81. *Stull R.B.* An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1988. 688 p.
 82. *Белан Б.Д.* Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // *Оптика атмосф. и океана*. 1994. Т. 7, № 8. С. 1045–1054.
 83. *O’Shea S.J., Allen G., Gallagher M.W., Bower K., Illingworth S.M., Muller J.B.A., Jones B.T., Percival C.J., Bauguitte S.J.B., Cain M., Warwick N., Quiquet A., Skiba U., Drewer J., Dinsmore K., Nisbet E.G., Lowry D., Fisher R.E., France J.L., Aurela M., Lohila A., Hayman G., George C., Clark D.B., Manning A.J., Friend A.D., Pyle J.* Methane and carbon dioxide fluxes and their regional scalability for the European Arctic wetlands during the MAMM project in summer 2012 // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 23. P. 13159–13174.
 84. *Sweeney C., Chatterjee A., Wolter S., McKain K., Bogue R., Conley S., Newberger T., Hu L., Ott L., Poulter B., Schiferl L., Weir B., Zhang Z., Miller C.E.* Using atmospheric trace gas vertical profiles to evaluate model fluxes: A case study of Arctic-CAP observations and GEOS simulations for the ABOVE domain // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22, N 9. P. 6347–6364.
 85. *Yurganov L., Muller-Karger F., Leifer I.* Methane increase over the Barents and Kara seas after the autumn pycnocline breakdown: Satellite observations // *Adv. Polar Sci.* 2019. V. 30, N 4. P. 382–390.
 86. *Yurganov L., Carroll D., Pnyushkov A., Polyakov I., Zhang H.* Ocean stratification and sea-ice cover in Barents and Kara seas modulate sea-air methane flux: Satellite data // *Adv. Polar Sci.* 2021. V. 32, N 2. P. 118–140.
 87. *Panov A., Prokushkin A., Kübler K.R., Korets M., Urban A., Bondar M., Heimann M.* Continuous CO₂ and CH₄ observations in the coastal Arctic atmosphere of the Western Taimyr Peninsula, Siberia: The first results from a new measurement station in Dikson // *Atmosphere*. 2021. V. 12, N 7. P. 876.
 88. *Thornton B.F., Prytherch J., Andersson K., Brooks I.M., Salisbury D., Tjernström M., Crill P.M.* Shipborne eddy covariance observations of methane fluxes constrain Arctic sea emissions // *Sci. Adv.* 2020. V. 6, N 5. P. eaay7934.
 89. *Hartery S., Commancé R., Lindaas J., Sweeney C., Henderson J., Mountain M., Steiner N., McDonald K., Dinardo S.J., Miller C.E., Wofsy S.C., Chang R.Y.-W.* Estimating regional-scale methane flux and budgets using CARVE aircraft measurements over Alaska // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 1. P. 185–202.
 90. *Roth F., Sun X., Geibel M.C., Prytherch J., Brüchert V., Bonaglia S., Broman E., Francisco Nascimento F., Norkko A., Humborg C.* High spatiotemporal variability of methane concentrations challenges estimates of emissions across vegetated coastal ecosystems // *Glob Change Biol.* 2022. V. 28, N 14. P. 4308–4322.
 91. *Поддубный В.А., Наговицына Е.С., Маркелов Ю.И., Бугевич А.Г., Антонов К.Л., Омелькова Е.В., Манжуров И.Л.* Оценка пространственного распределения концентрации метана в районе Баренцева и Карского морей в летний период 2016–2017 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 3. С. 77–86.
 92. *Киселев А.А., Решетников А.И.* Метан в Российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов // *Проблемы Арктики и Антарктиды*. 2013. № 2. С. 5–15.
 93. *Анисимов О.А., Зимов С.А., Володин Е.М., Лагров С.А.* Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 5. С. 131–143.
 94. *Богоявленский В.И.* Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11, № 1. С. 51–66.
 95. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н.* Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 1, № 3. С. 362–373.
 96. *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 616 с.

O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, E.V. Guruleva, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, K. Law, T.M. Rasskazchikova, J.-D. Paris, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Air composition over the Russian sector of the Arctic in September 2020. 1. Methane.**

In the Arctic, global warming is 2–3 times faster than over other regions of the globe. As a result, noticeable changes are already being recorded in all areas of the environment. However, there is very little data on such changes in the Russian Arctic. Therefore, to fill the gap in the data on the vertical distribution of the gas and aerosol composition of air in this region, an experiment was carried out on the Tu-134 Optical laboratory aircraft in September 2020 to sound the atmosphere and water surface over the water areas of all seas in the Russian Arctic. This paper analyzes the spatial distribution of methane. It is shown that during the experiment its concentration was the highest over the Kara Sea (2090 ppb), the lowest over the Chukchi Sea (2005 ppb). The East Siberian and Bering seas were slightly different from the Chukchi Sea in its content. Average values of CH₄ are characteristic of the Barents (2030 ppb) and the Laptev Seas (2040 ppb). The difference in the concentrations between the level of 200 meters and the free troposphere reached 150 ppb over the Kara Sea, decreased to 91 and 94 ppb over the Barents and Laptev Seas, and further decreased over the East Siberian, Chukchi and Bering Seas to 66, 63 and 74 ppb, respectively. Horizontal heterogeneity in the distribution of methane over the Arctic seas is the greatest over the Laptev Sea, where it reaches 73 ppb. It is 2 times higher than over the Barents and Kara Seas, and 5–7 times higher than over the East Siberian and Bering Seas.

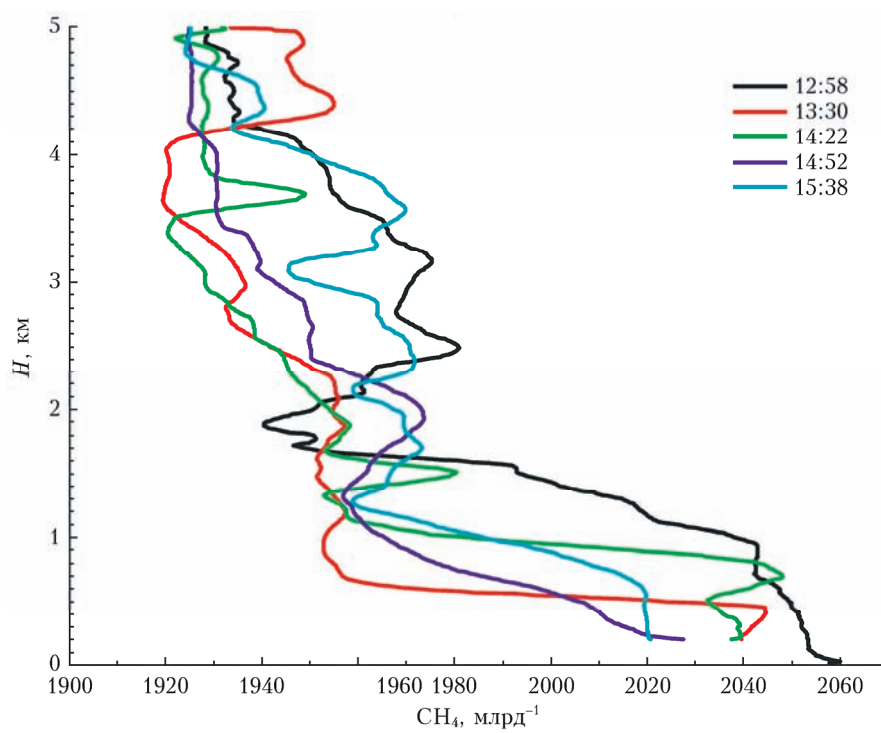


Рис. 1. Вертикальное распределение концентрации метана над Архангельском (12:58) и Баренцевым морем (13:30, 14:22, 14:52 и 15:38) 4.09.2020 г.

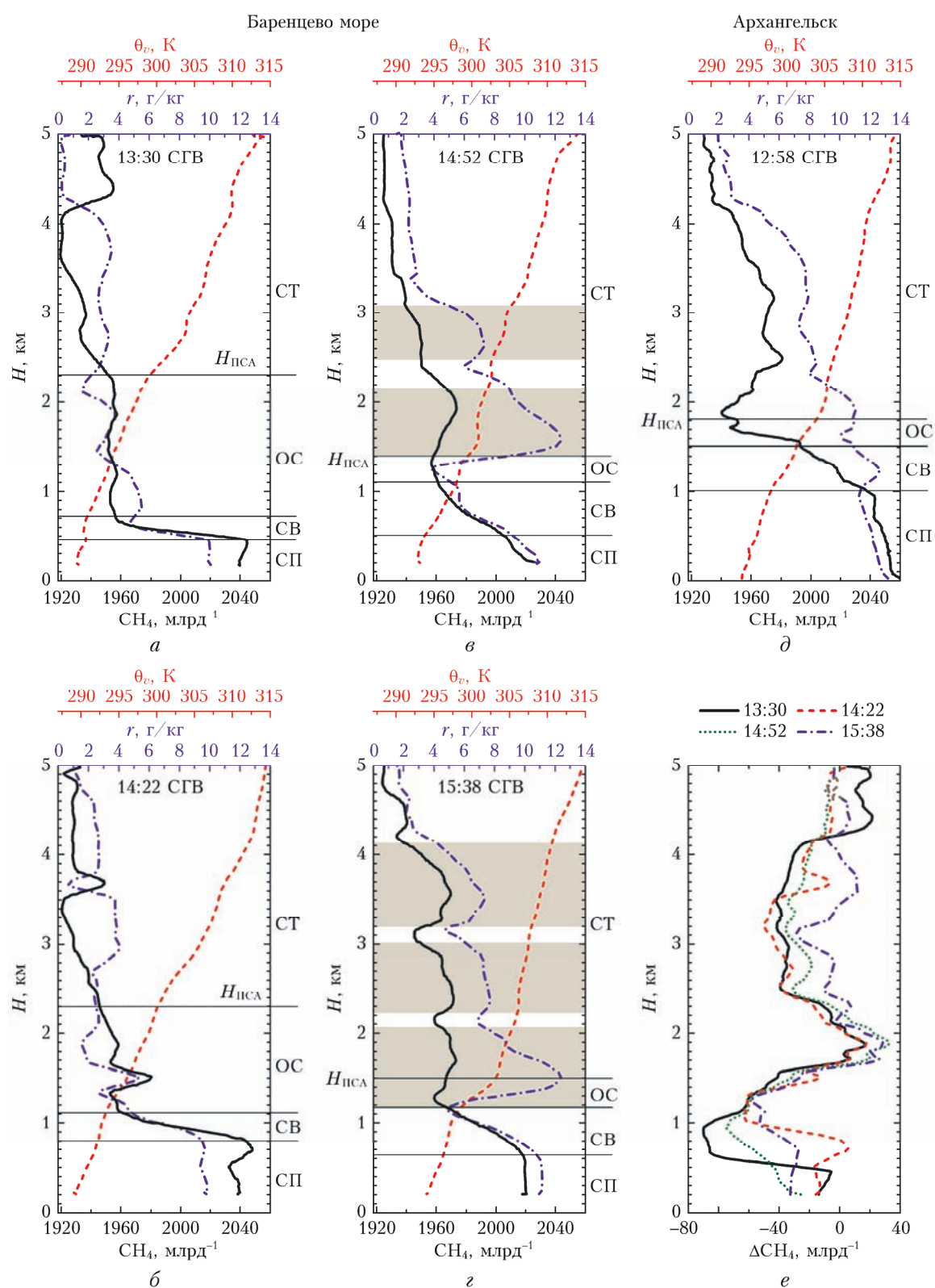


Рис. 2. Вертикальное распределение концентрации метана (черная кривая) и отношения смеси водяного пара r (синяя кривая) и виртуальной потенциальной температуры θ_v (красная кривая) над Баренцевым морем (а-б) и в районе Архангельска (д); разности концентраций метана («суша-море») (е) 4.09.2020 г. Здесь и далее на рисунках: СП – слой перемешивания, СВ – слой вовлечения, ОС – остаточный слой, СТ – свободная тропосфера; серыми областями обозначены облачные слои

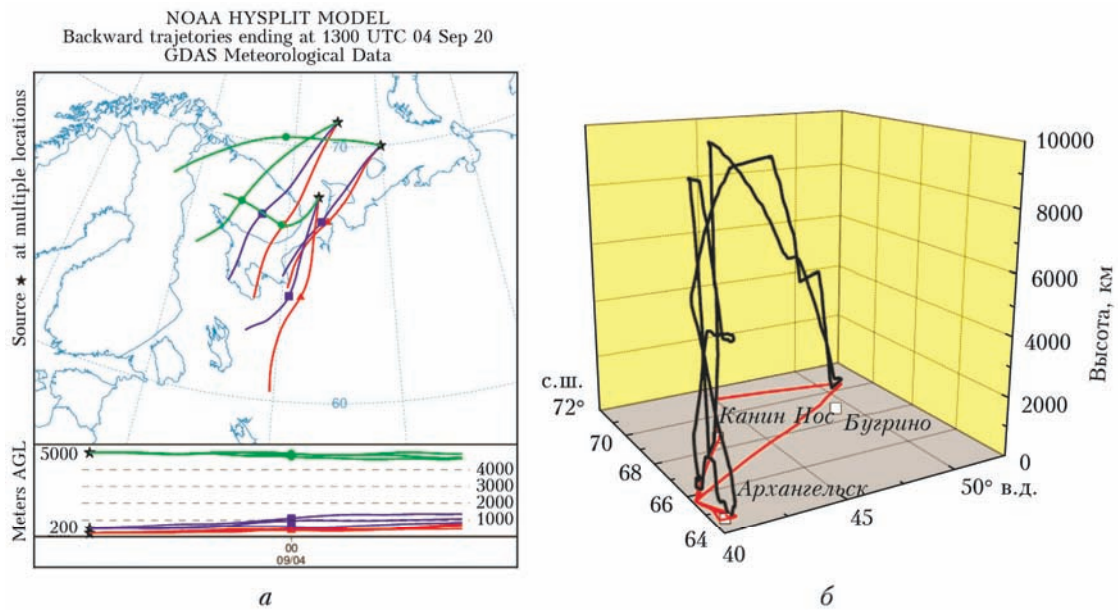


Рис. 3. Обратные траектории движения воздушных масс (*a*), построенные для районов измерений вертикальных профилей концентрации метана (13:00–15:00 СГВ, 4.09.2020 г.) и схема полета в район Баренцева моря (*б*)

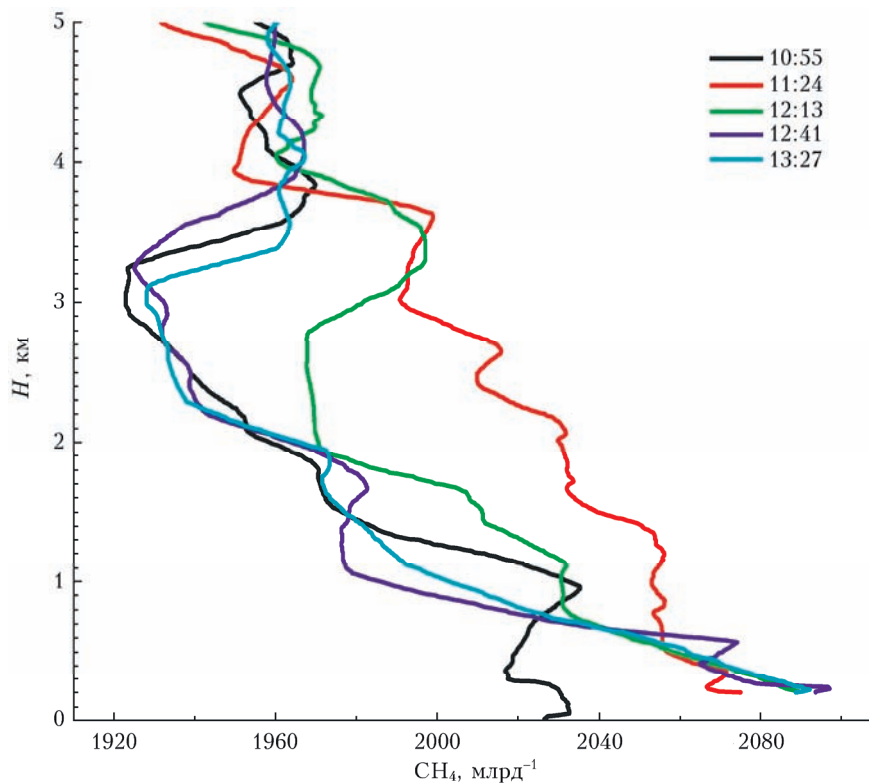


Рис. 4. Вертикальное распределение концентрации метана над Нарьян-Маром (10:55) и Карским морем (11:24, 12:13, 12:41 и 13:27) 6.09.2020 г.

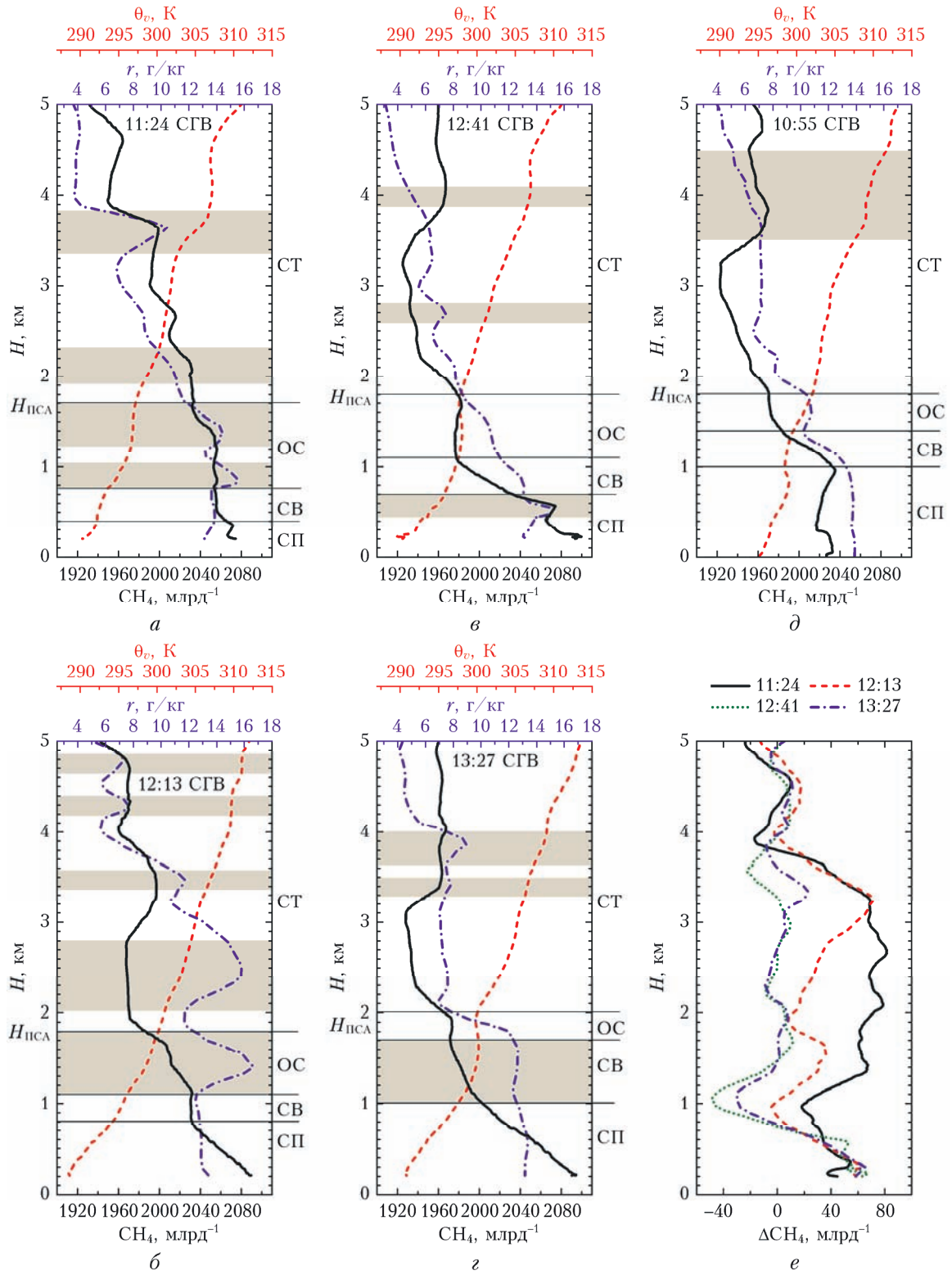


Рис. 5. Вертикальное распределение концентрации метана (черная кривая), отношения r (синяя кривая) и θ_v (красная кривая) над Карским морем (a–d) и в районе Нарьян-Мара (e); разности концентраций метана («суша–море») (e) 6.09.2020 г.

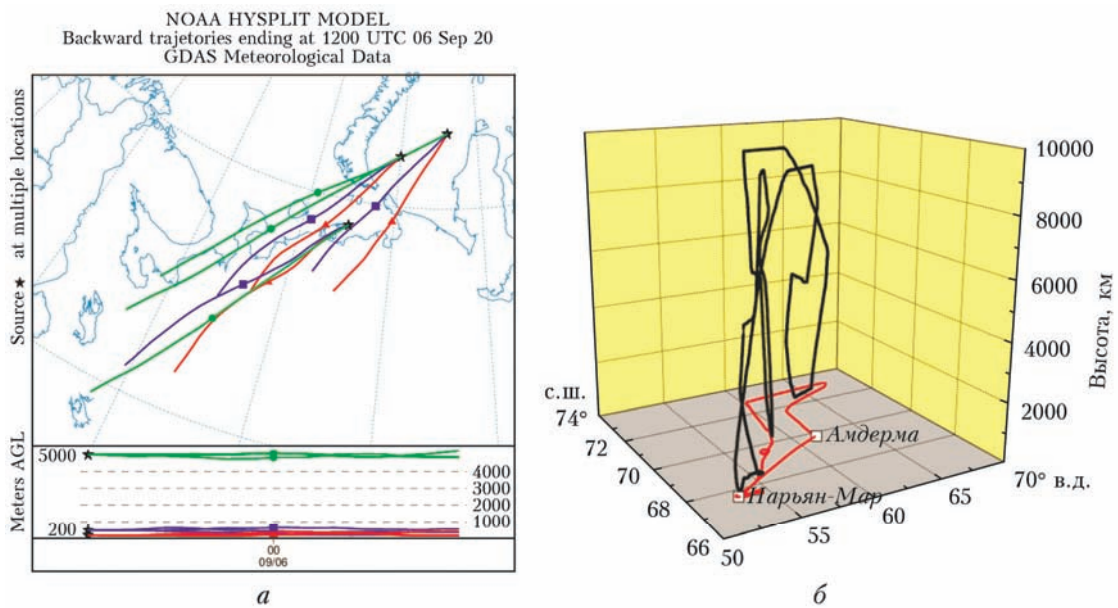


Рис. 6. Обратные траектории движения воздушных масс (а), построенные для районов вертикальных профилей метана (11:00–13:00 СГВ, 6.09.2020 г.) и схема полета в район Карского моря (б)

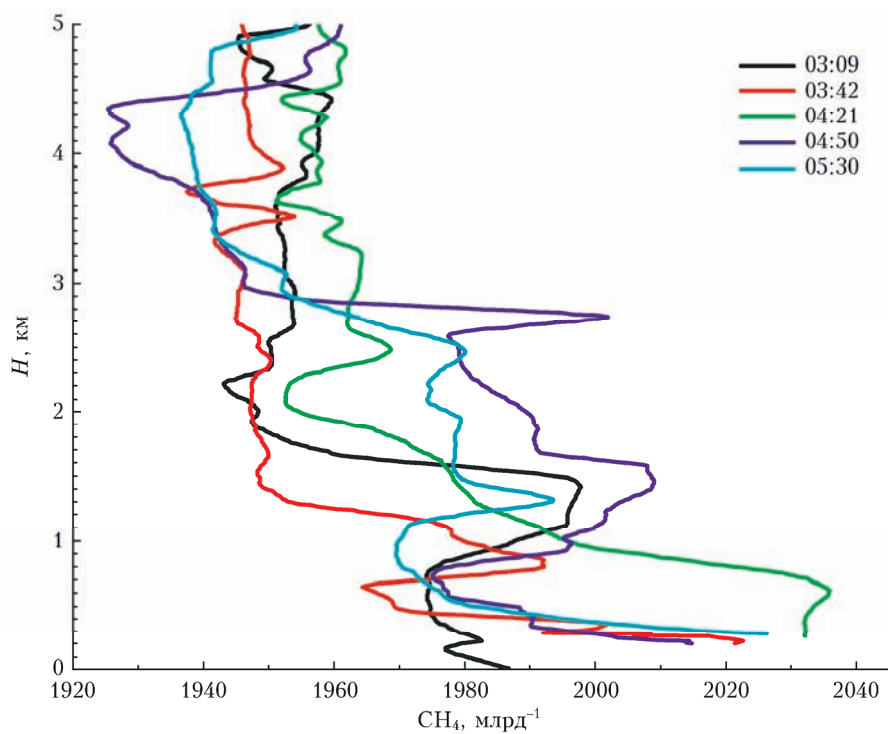


Рис. 7. Вертикальное распределение концентрации метана над Тикси (03:09) и морем Лаптевых (03:42, 04:21, 04:50 и 05:30) 9.09.2020 г.

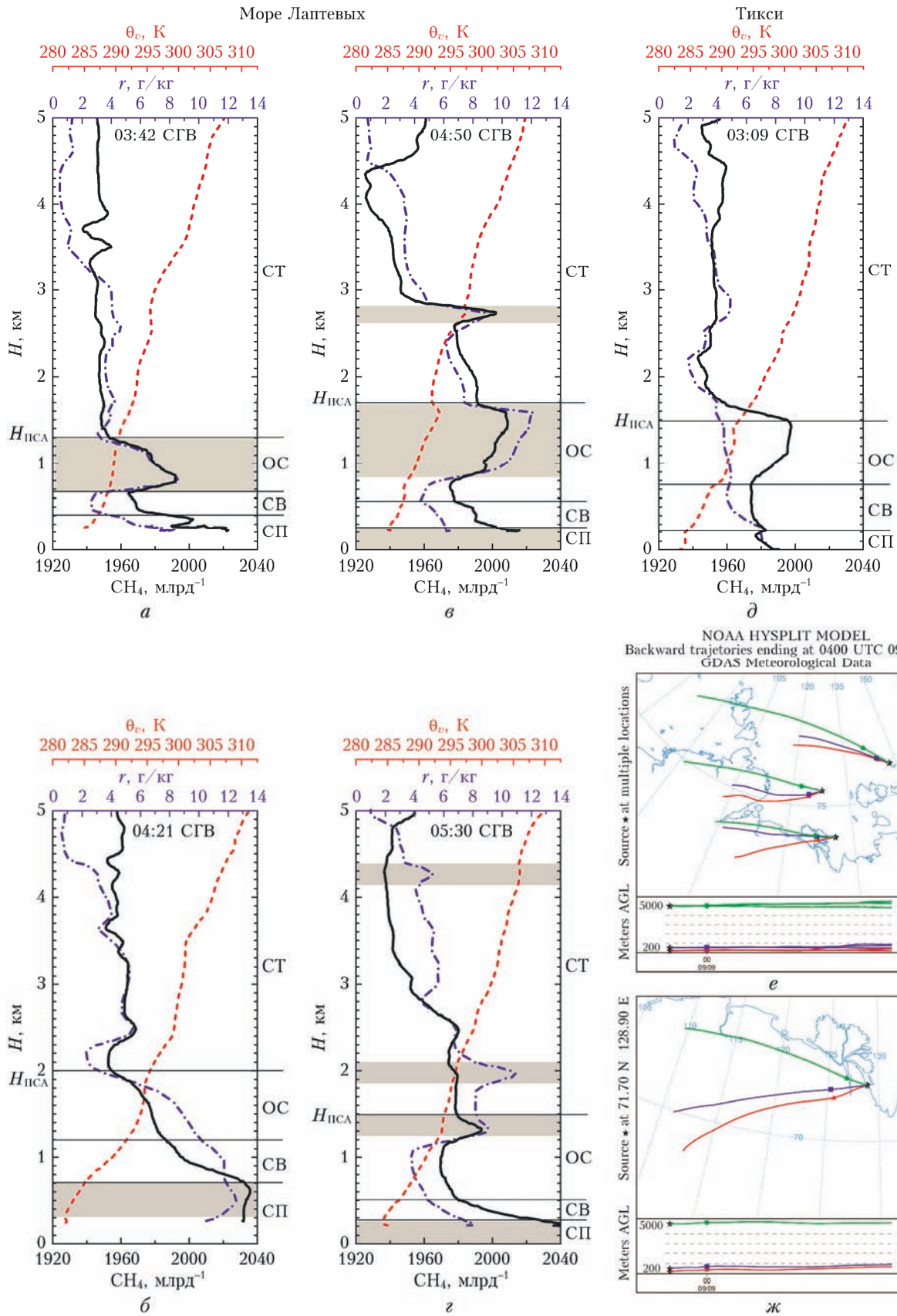


Рис. 8. Вертикальное распределение концентрации метана (черная кривая), отношения r (синяя кривая) и θ_e (красная кривая) над морем Лаптевых (а–г) и в районе Тикси (д); обратные траектории движения воздушных масс, построенные для районов вертикальных профилей метана над морем Лаптевых (е) и Тикси (ж) (03:00–05:00, 9.09.2020 г.)

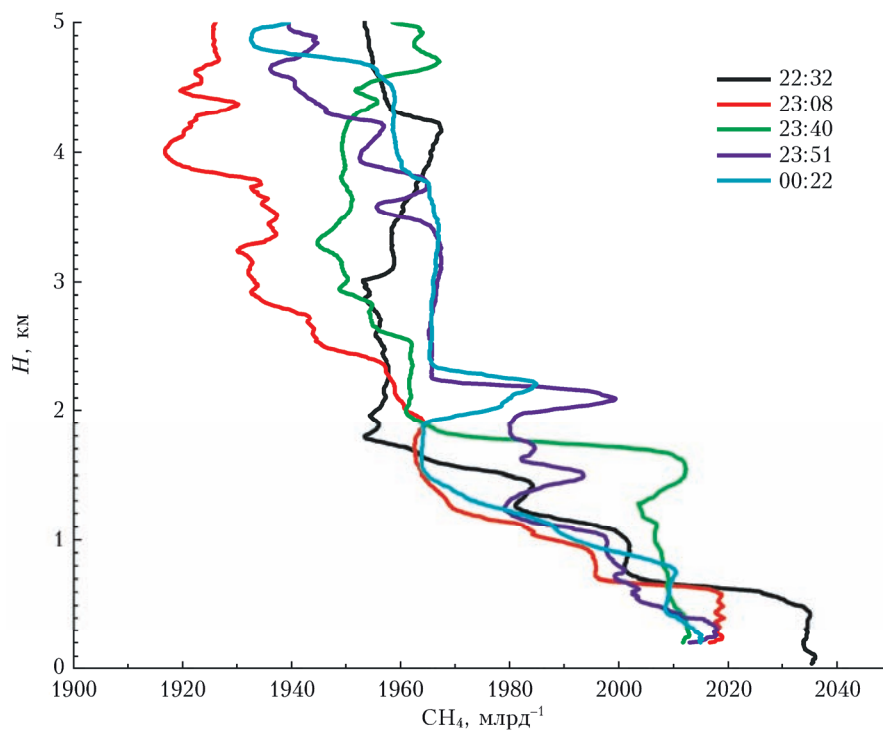


Рис. 9. Вертикальное распределение концентрации метана над Анадырем (22:32) и Восточно-Сибирским морем (23:08, 23:40, 23:51 и 00:22) 15–16.09.2020 г.

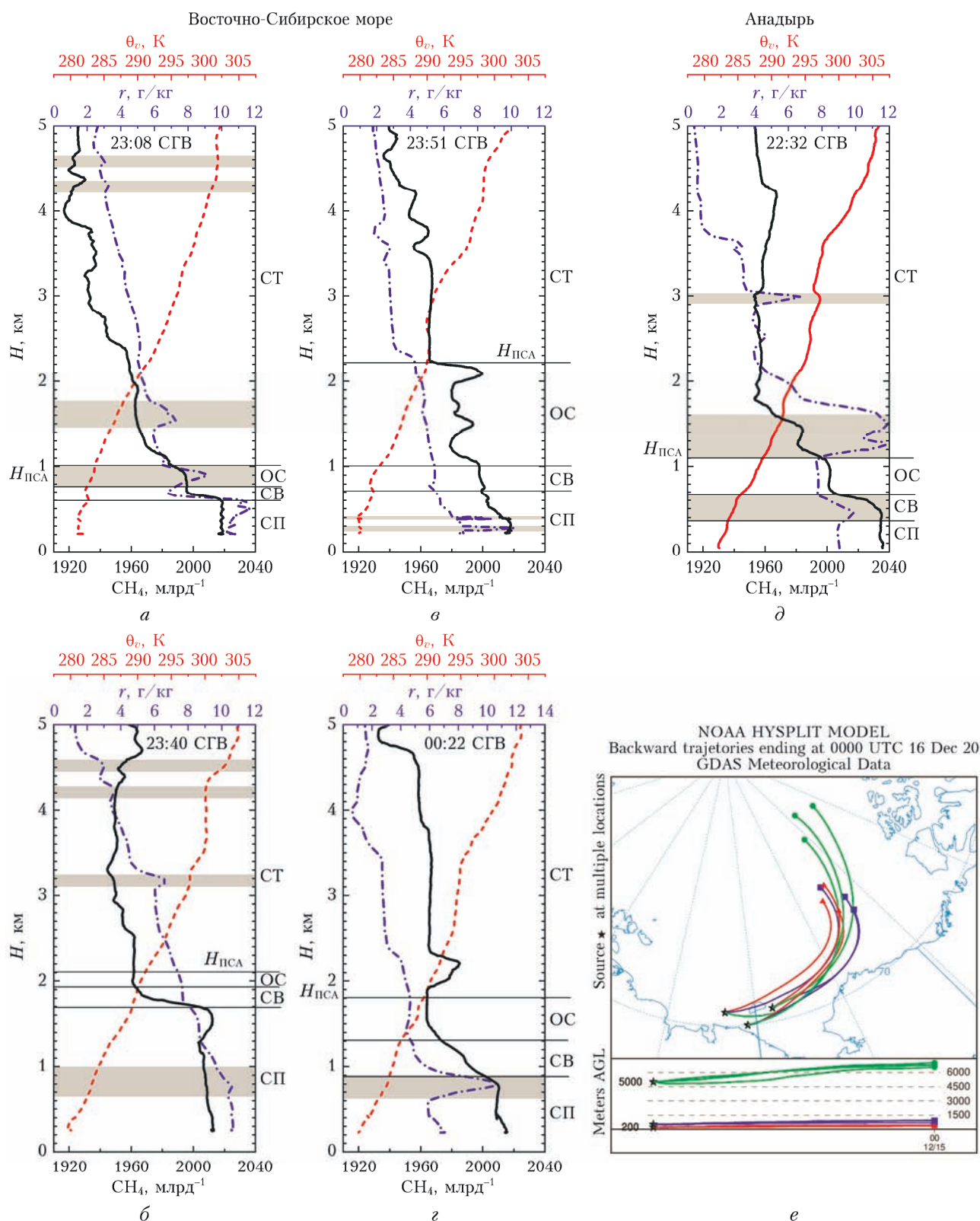


Рис. 10. Вертикальное распределение концентрации метана (черная кривая), отношения r (синяя кривая) и θ_v (красная кривая) над Восточно-Сибирским морем (а–г) и в районе Анадыря (д); обратные траектории движения воздушных масс, построенные для районов вертикальных профилей метана над Восточно-Сибирским морем (е) (03:00–05:00 15–16.09.2020 г.)

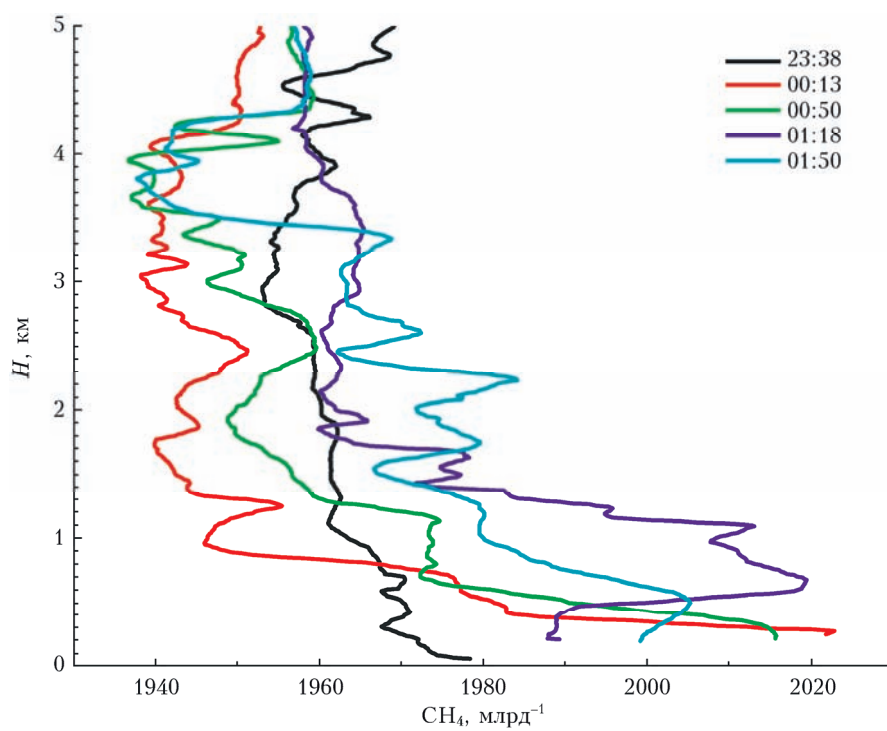


Рис. 11. Вертикальное распределение концентрации метана над Анадырем (23:38) и Чукотским морем (00:13, 00:50, 01:18 и 01:50) 14–15.09.2020 г.

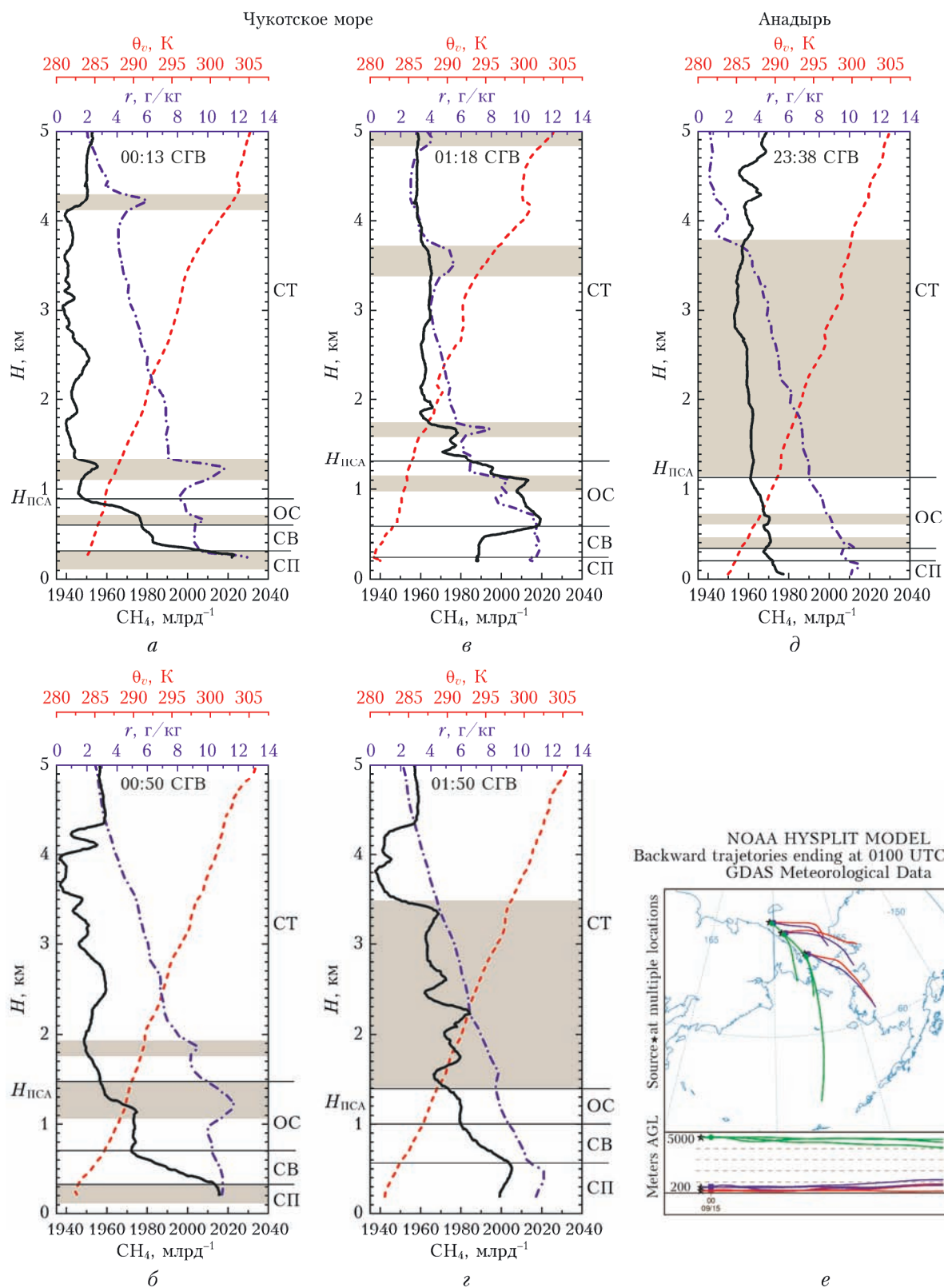


Рис. 12. Вертикальное распределение концентрации метана (черная кривая), отношения r (синяя кривая) и θ_v (красная кривая) над Чукотским морем (а–д) и в районе Анадыря (д); обратные траектории движения воздушных масс, построенные для районов вертикальных профилей метана над Чукотским морем (е) (00:00–02:00, 14–15.09.2020 г.)

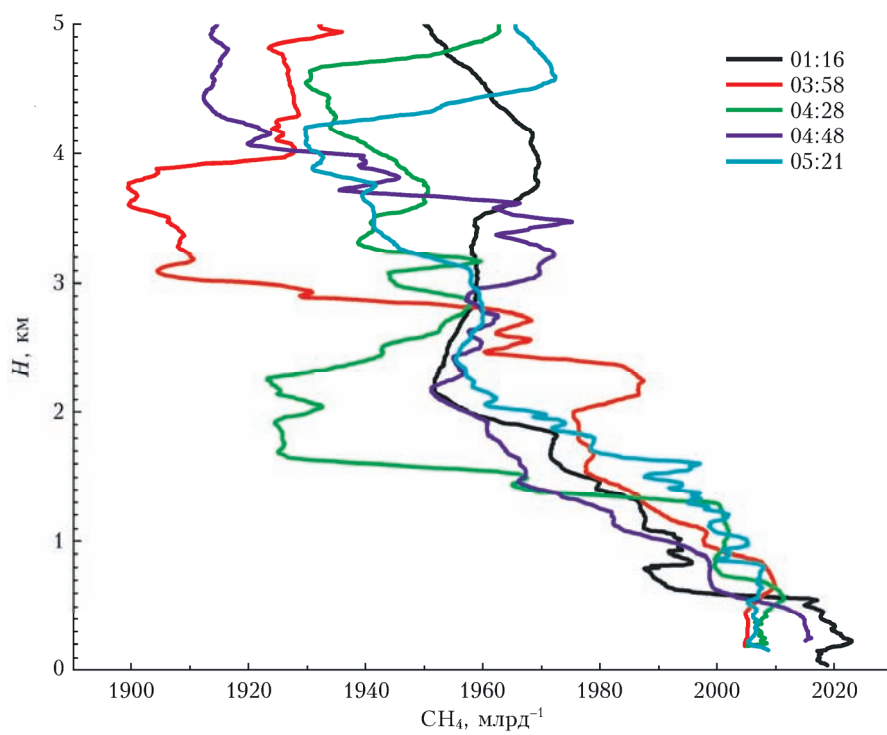


Рис. 13. Вертикальное распределение концентрации метана над Анадырем (01:16) и Беринговым морем (03:58, 04:28, 04:48 и 05:21) 16.09.2020 г.

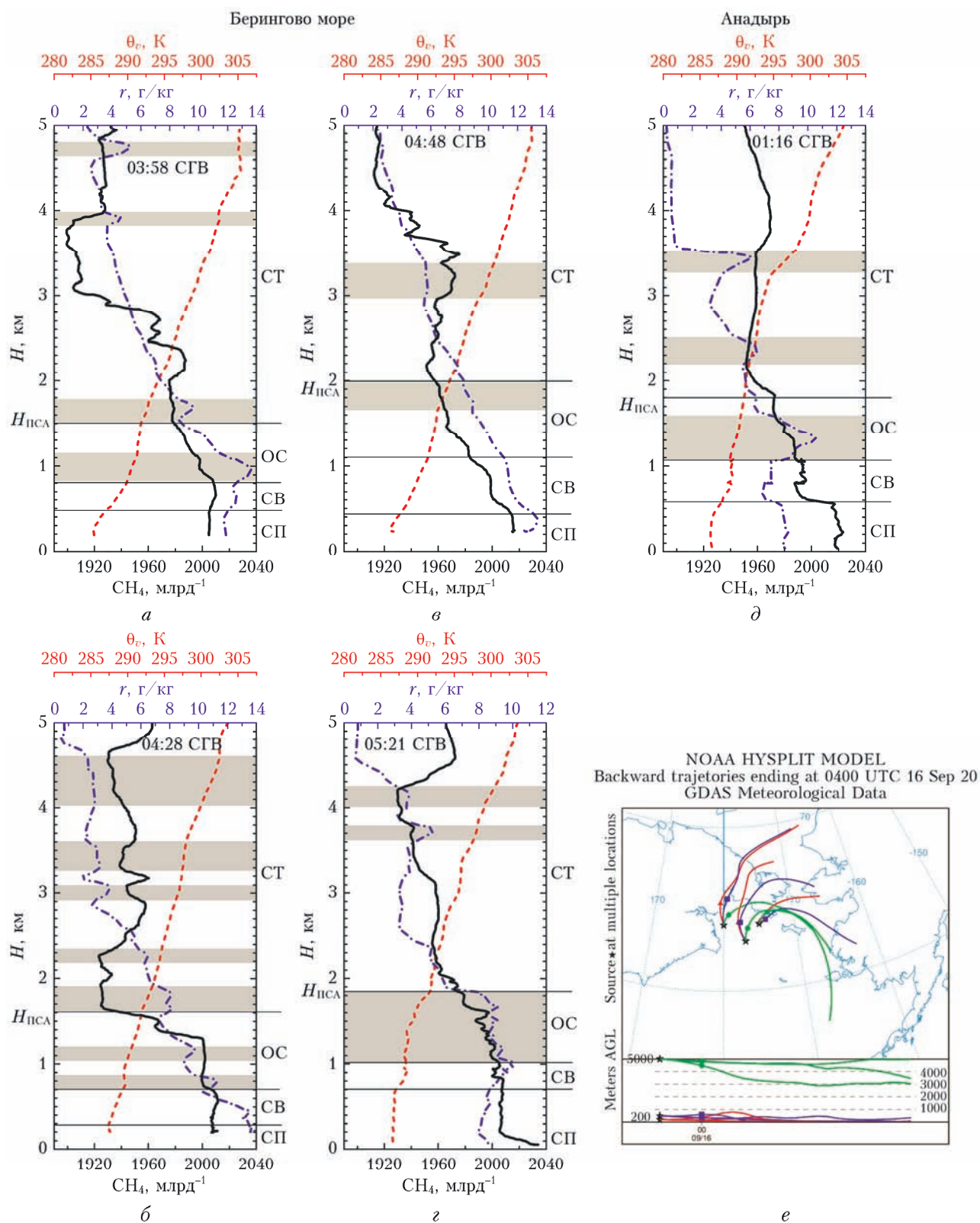


Рис. 14. Вертикальное распределение концентрации метана (черная кривая), отношения r (синяя кривая) и θ_p (красная кривая) над Беринговым морем (a–d) и в районе Анадыря (e); обратные траектории движения воздушных масс, построенные для районов вертикальных профилей метана над Беринговым морем (e) (04:00–05:00, 16.09.2020 г.)

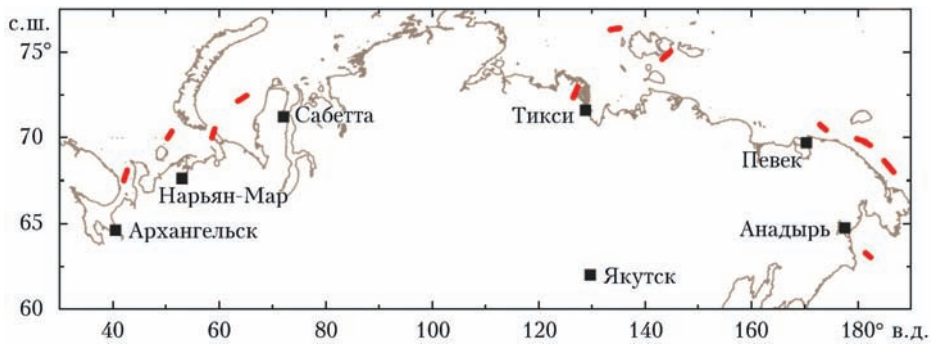


Рис. 15. Участки (красные линии), на которых производились измерения метана

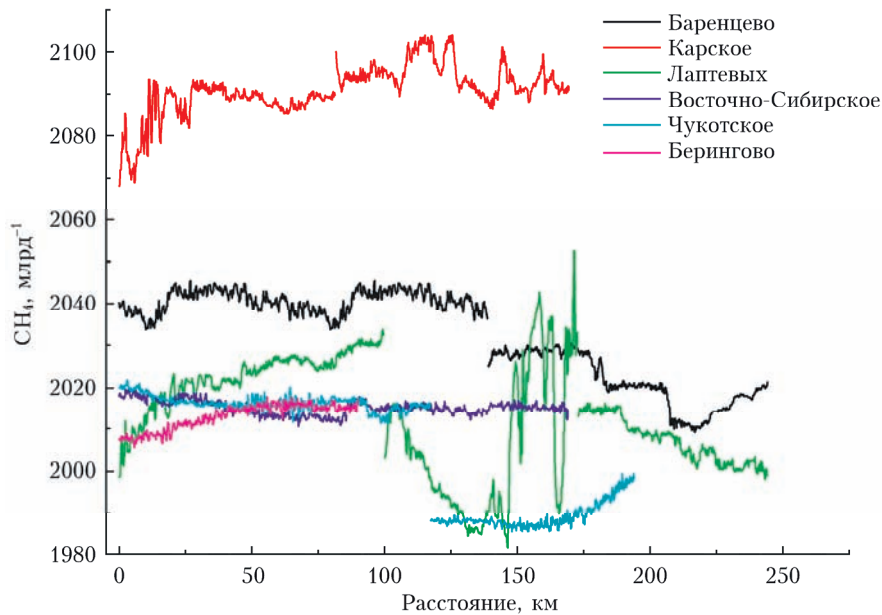


Рис. 16. Концентрация метана на высоте 200 м над морями Российского сектора Арктики

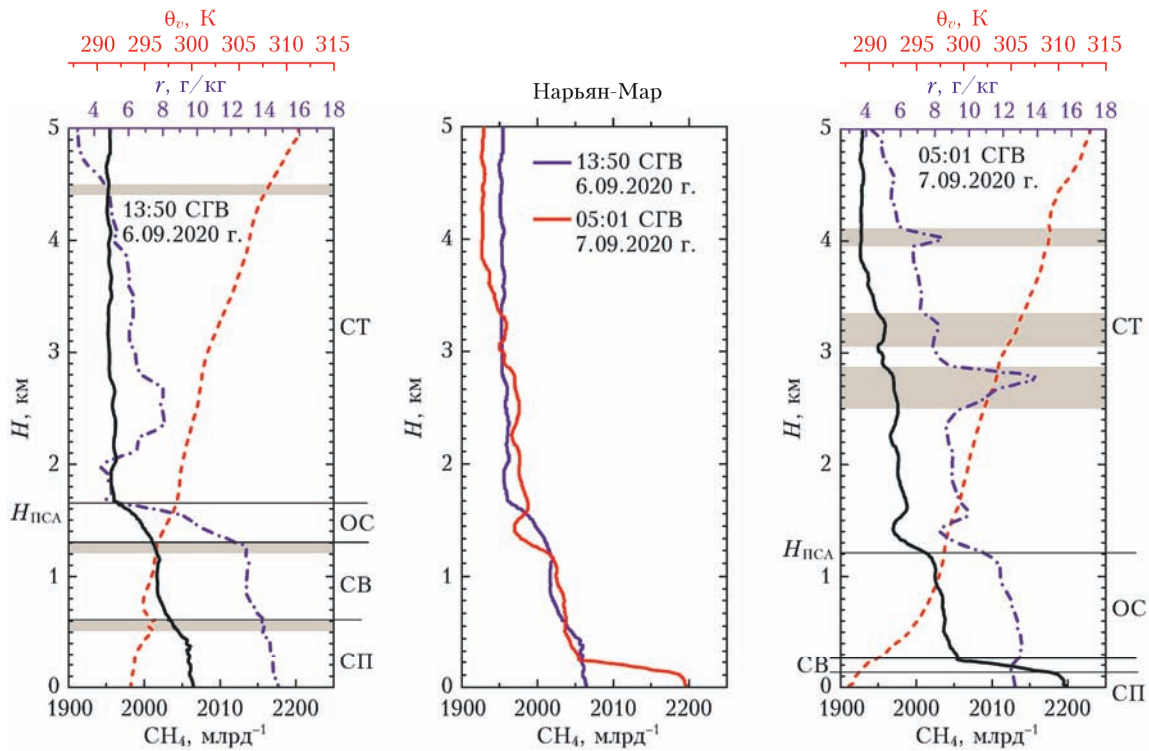


Рис. 17. Полученные в районе Нарьян-Мара вертикальные профили концентрации метана (б); концентрации метана (черная кривая), отношения смеси r (синяя кривая) и θ_p (красная кривая) (а, в) 6 и 7.09.2020 г.