

## ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ 2.3. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ И ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ

### Программа 2.3.1. Оптика, лазерная физика

Учеными Института лазерной физики экспериментально реализованы захват и охлаждение атомов магния в магнитооптической ловушке (МОЛ). Это первая магнитооптическая ловушка в России для щелочно-земельных элементов, представляющих большой интерес для создания нового поколения оптических стандартов частоты. Проведены исследования по оптимизации параметров МОЛ для получения максимального количества захваченных атомов, измерены время загрузки МОЛ, температура облака холодных атомов и количество захваченных атомов (рис. 10). Полученные результаты открывают практическую возможность реализации впервые разработанного в ИЛФ СО РАН метода решеточно-индуцированной спектроскопии сильно запрещенных оптических переходов. В этом методе происходит перемешивание состояний  $3P_0$  и  $3P_1$  эллиптически-поляризованным полем решетки на «магической» длине волны. Данный результат имеет принципиальное значение для создания первичных лазерных стандартов частоты и времени со стабильностью частоты  $10^{-17}$ — $10^{-18}$ , основанных на холодных атомах, захваченных в оптической решетке.

Учеными этого же Института теоретически и экспериментально показано, что в процессе филаментации фемтосекундного излучения в газовой ячейке (рис. 11) наблюдается сложная динамика преобразования временных, спектральных и пространственных параметров излучения, которые при определенных условиях приводят к временному самосжатию импульса. При этом длительность импульса уменьшается до величины, равной обратной ширине его спектра. Экспериментально реализованы режимы самосжатия фемтосекундных импуль-

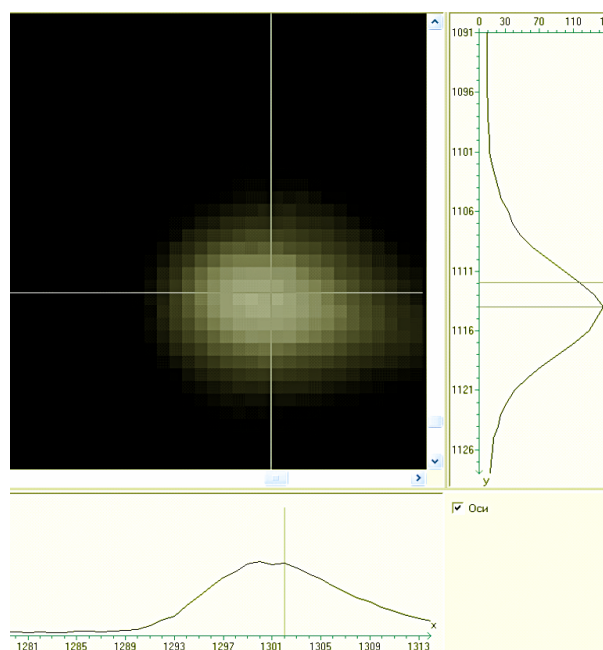


Рис. 10. Облако атомов Mg в МОЛ.

Диаметр облака атомов — 0,6 мм на полувысоте яркостного сигнала. Масштаб изображения на кадре — 20 пикселей на 1 мм. Количество атомов в облаке  $3 \cdot 10^5$  ат. при  $T \sim 4,5$  мК.

сов в ксеноне и аргоне, автокорреляционные функции которых представлены на рис. 12.

Исследования показывают, что метод сжатия импульсов при филаментации открывает путь к формированию оптических импульсов предельно короткой длительности, достигающей 5—10 фс, которые могут быть усилены до мультитераваттного уровня мощности в параметрических и лазерных усилительных каскадах.

Учеными Института автоматики и электротехники сделан существенный вклад в разработку методов 3D оптической памяти. В рам-

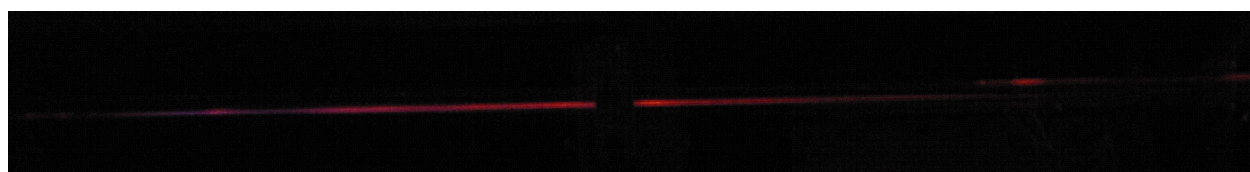
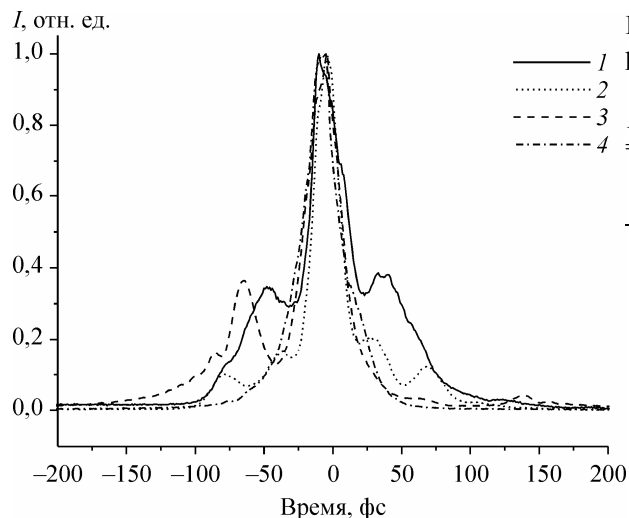
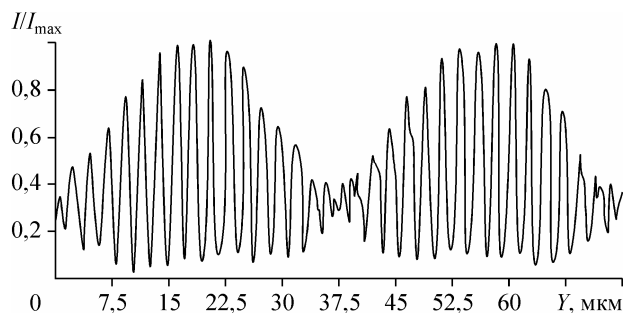


Рис. 11. Филаментация фемтосекундного лазерного излучения в аргоне.



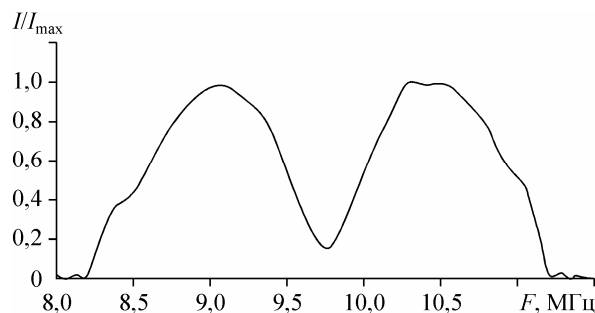
**Рис. 12.** Автокорреляционные функции второго порядка импульсов фемтосекундного излучения, сжатых в процессе филаментации в аргоне и ксеноне.  
 1 — Ar,  $F = 133$  см,  $t = 21,4$  фс; 2 — Ar,  $F = 200$  см,  $t = 16,1$  фс; 3 — Xe,  $F = 133$  см,  $t = 20,6$  фс; 4 — Xe,  $F = 200$  см,  $t = 19,6$  фс.

ках экспериментального исследования процессов лазерной многоканальной записи и коллинеарного гетеродинного считывания в модели  $2 \times 3D$  оптической памяти исследованы особенности регистрации и анализа структуры голограмм, получаемых одноступенчатым ме-



**Рис. 13.** Экспериментально определенное распределение интенсивности в плоскости среды.

тодом. Полученное распределение интенсивности в плоскости среды показано на рис. 13. Результат считывания в виде фильтрованного значения огибающей сигнала приведен на рис. 14. Как видно из рисунков, сигналы разделяются по частоте. Отсутствует взаимно-однозначное соответствие спектров записываемого и считанного сигналов, поэтому частоты максимумов при записи и считывании не совпадают. Вид огибающей (пологие склоны и крутой провал в центре) соответствует сигналу, который обычно появляется при считывании двух решеток с противоположными начальными фазами.



**Рис. 14.** Результат считывания в виде фильтрованного значения огибающей сигнала.

### Программа 2.3.2. Фундаментальные проблемы взаимодействия излучения с веществом

Учеными Института автоматики и электрометрии и Института геологии и минералогии показано, что созданная искусственно композиция из двух фотонно-кристаллических пленок опала имеет не перекрывающиеся брэгговские резонансы, совпадающие с таковыми для отдельных пленок А и В, что указывает на постоянство периодов монокристаллических пленок в гетероструктуре ВА (рис. 15, а). При изменении угла падения в спектре пропускания гетероструктур соответствующие минимумы смещаются в коротковолновую сторону, не перекрываясь даже для больших углов ( $45\text{—}50^\circ$ ), что свидетельствует о хорошей кристаллической структуре пленок. Электронно-

микроскопический анализ слоистых гетероструктур опала показывает одинаково ориентированные (без доменов) гексагонально упакованные слои монодисперсных наносфер кремнезема с плоскостью [111], параллельной подложке, как в первой, так и во второй пленке. Пленки в гетероструктуре однородны по толщине (см. вставку на рис. 15, а). Резкая граница между пленками демонстрирует, что формирование второй пленки происходит независимо от профиля нижней.

По мере увеличения числа фотонно-кристаллических пленок в гетероструктуре опала происходит модификация спектра отражения пленочной гетероструктуры и стоп-зоны испы-

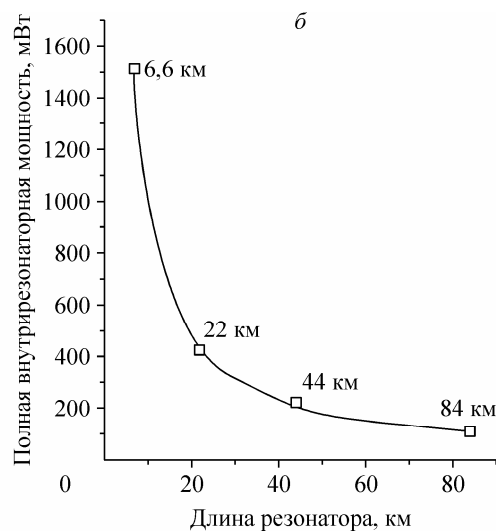
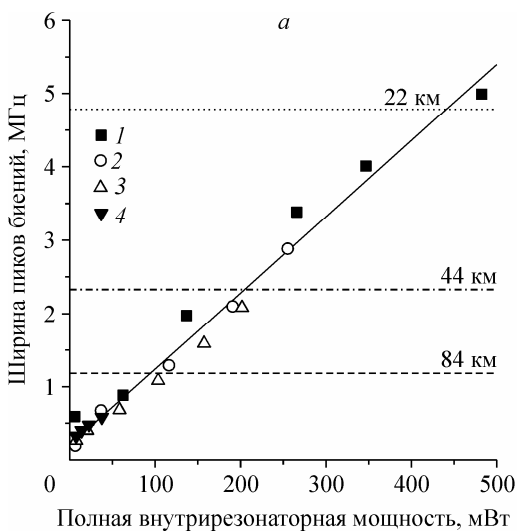
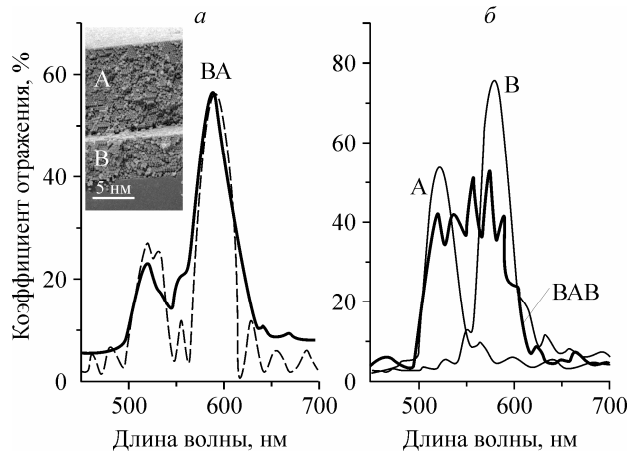
тывают отчетливую модуляцию, т. е. появляются разрешенные фотонные состояния (см. рис. 15, б, линия ВАВ).

Известно, что спектр излучения лазера состоит из «гребенки» спектральных компонент (мод), частоты которых отличаются на величину  $\Delta = c/(2L)$ , определяющуюся длиной резонатора  $L$  и скоростью света в среде  $c$ . В работе ученых Института автоматики и электрометрии длина резонатора увеличена до рекордного значения  $L = 84$  км в схеме волоконного ВКР-лазера с генерацией вблизи окна прозрачности ( $\sim 1,5$  мкм). Показано, что межмодовый интервал в соответствии с формулой уменьшается до предельно малых величин  $\Delta \sim 1$  кГц, а число

генерируемых мод достигает  $N \sim 10^8$ . При этом модовая структура разрешима в радиочастотном спектре только при малой мощности излучения. С ростом мощности ширина пика сравнивается с межмодовым интервалом, и спектр из «гребенки» превращается в «квазинепрерывный» (рис. 16, а). Величина критической мощности обратно пропорциональна длине (рис. 16, б) и составляет  $\sim 100$  мВт при  $L = 84$  км. Показано, что причиной замыкания является дефазировка турбулентного характера из-за нелинейного взаимодействия большого количества генерируемых мод. Реализация сверхдлинного ВКР-лазера непосредственно в линии связи позволяет передавать сигнал поч-

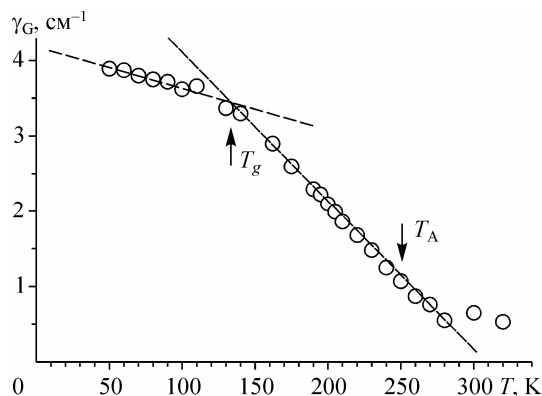
**Рис. 15.** Спектры отражения пленочной гетероструктуры опала.

а — состоящей из двух фотонно-кристаллических пленок А и В (жирная линия). Штриховая линия — расчет коэффициента отражения структуры ВА в модели планарной слоисто-периодической среды из наночастиц  $a$ -SiO<sub>2</sub>. На врезке — срез гетероструктуры опала из двух различных фотонно-кристаллических пленок А и В; б — состоящей из трех пленок ВАВ (жирная линия). Линии А и В отвечают спектрам отдельных пленок А и В соответственно. Угол падения света 5°. Пленка А состоит из 23 монослоев (диаметр сфер 235 нм). Пленки В содержат по 16 монослоев (диаметр сфер 260 нм).



**Рис. 16.** Экспериментальные точки для ширин пиков биений в зависимости от внутризональной мощности при различных длинах резонатора и соответствующие значения межмодового интервала — горизонтальные линии (а) и предельная мощность, при которой модовая структура замыкается (б).

Сплошные линии иллюстрируют линейную (а) и  $1/x$  (б) аппроксимации. Длина резонатора, км: 6,6 (1), 22 (2), 44 (3), 84 (4).



**Рис. 17.** Температурная зависимость неоднородного уширения линии КРС ( $548 \text{ см}^{-1}$ ) в пиколине.

Стрелками показаны особые точки — температура стеклования ( $T_g$ ) и переход от аррениусовского к неаррениусовскому поведению ( $T_A$ ).

ти без затухания, что представляет большой практический интерес.

Учеными Института автоматики и электротехники экспериментально обнаружен переход от газоподобной к стекольной динамике жидкости при повышении ее вязкости.

В настоящее время существуют два подхода к описанию молекулярной динамики жидкостей. В случае маловязких жидкостей

обычно используют подход, в котором жидкость рассматривается как аналог плотного газа (каждая молекула ведет себя как независимая молекула в эффективной среде). В случае вязких сред обычно используют подход, рассматривающий жидкость на малых временах как твердое тело (стекло). Граница, разделяющая эти описания, не определена.

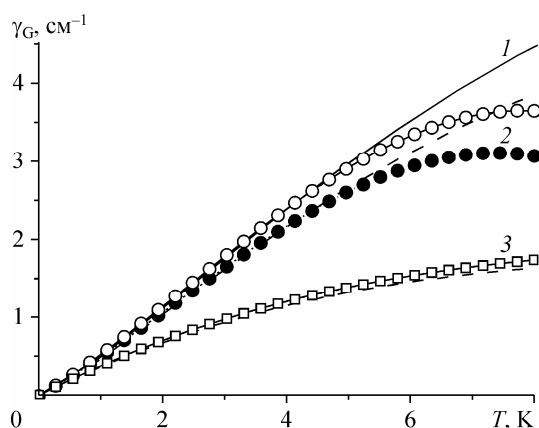
Для решения этой проблемы был использован анализ неоднородного уширения линий комбинационного рассеяния света (КРС) в стеклюющейся жидкости  $\alpha$ -пиколин в широком температурном диапазоне. В состоянии стекла ( $T < T_g$ ) распределение неоднородностей заморожено и слабо зависит от температуры (рис. 17). Выше  $T_g$  неоднородное уширение резко уменьшается с ростом температуры и стремится к нулю при некоторой конечной величине  $T$ , что свидетельствует о переходе  $\alpha$ -пиколина к состоянию плотного газа.

Таким образом, исследование формы линий спектра КРС позволяет экспериментально обнаружить и охарактеризовать переход молекулярной динамики от газоподобного к стекольному поведению молекул при охлаждении жидкости.

### Программа 2.3.3. Актуальные вопросы оптики атмосферы

Учеными Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева разработана новая математическая модель для определения вклада многократного рассеяния в лидарных сигналах. Установлено, что коэффициенты построенного асимптотического ряда зависят от интегральных параметров микроструктуры среды и могут быть легко рассчитаны по простым аналитическим формулам. Полученное решение служит теоретической основой для построения алгоритмов восстановления размеров облачных капель из лидарных измерений (рис. 18).

В том же Институте на основе анализа фоновых метеорологических данных трех станций Монголии показано, что за последние годы наблюдается увеличение количества дней с пыльными бурями и их продолжительности. Наибольшая повторяемость пыльных бурь в атмосфере аридных территорий Монголии (пустыня Гоби) наблюдается в апреле—мае в дневные и вечерние часы (рис. 19, 20).



**Рис. 18.** Отношение многократно рассеянного лидарного сигнала к однократно рассеянному сигналу в зависимости от угла поля зрения приемника при оптической толщине слоя  $\tau = 2$ .

1 — расчет по точным формулам; 2 — кубическая аппроксимация асимптотическим рядом; 3 — приближение двукратного рассеяния. С учетом (сплошные линии) и без учета (штриховые линии) геометрооптической компоненты индикатрисы.

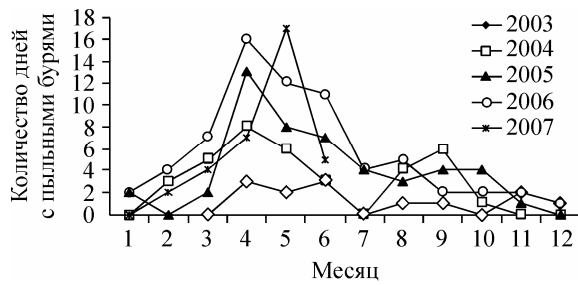


Рис. 19. Повторяемость пыльных бурь на ст. Сайншанд (2003—2007 гг.).

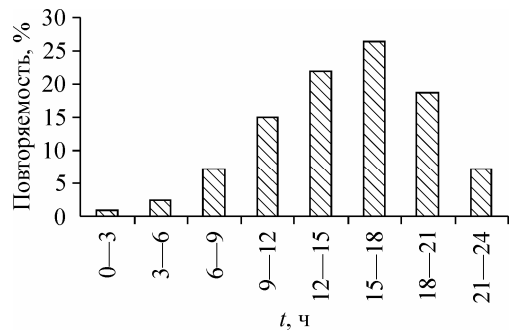


Рис. 20. Годовое изменение количества дней с пыльными бурями на ст. Сайншанд ( $44^{\circ} 54'$  с. ш.,  $110^{\circ} 07'$  в. д.).

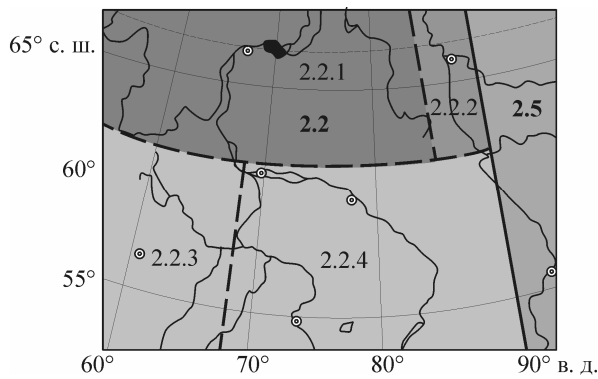


Рис. 21. Климатическое районирование территории Западной Сибири для зимы (сплошная синяя линия — граница квазиоднородных районов, штриховые — границы однородных подрайонов).

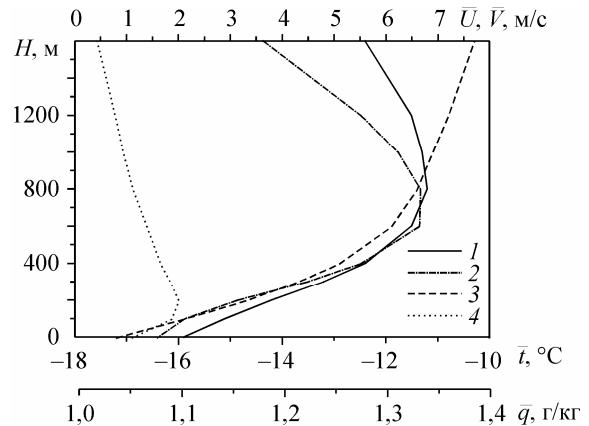


Рис. 22. Модельные профили высотного распределения температуры (1), влажности (2), зонального (3) и меридионального (4) ветра для подрайона 2.2.4, зима.

Учеными Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева разработаны оригинальные методы объективной классификации и моделирования вертикальной структуры метеорологических полей температуры, влажности и ветра для зимы и лета Западной Сибири (рис. 21, 22).

Проведенные в том же Институте исследования пространственного распределения углекислого газа  $\text{CO}_2$  и метана  $\text{CH}_4$  для Западной

Сибири показали, что наблюдается четкий широтный градиент концентраций обоих газов, направленный из северных к южным районам. Различия концентраций по  $\text{CO}_2$  достигают  $8 \text{ млн}^{-1}$  ( $398 \text{ млн}^{-1}$  на севере и  $390 \text{ млн}^{-1}$  на юге), по  $\text{CH}_4$  —  $115 \text{ млрд}^{-1}$  ( $2070 \text{ млрд}^{-1}$  на севере и  $1955 \text{ млрд}^{-1}$  на юге). Градиент  $\text{CO}_2$  составляет  $0,7 \text{ млн}^{-1}/\text{град.}$ ,  $\text{CH}_4$  —  $9,6 \text{ млрд}^{-1}/\text{град.}$  (рис. 23).

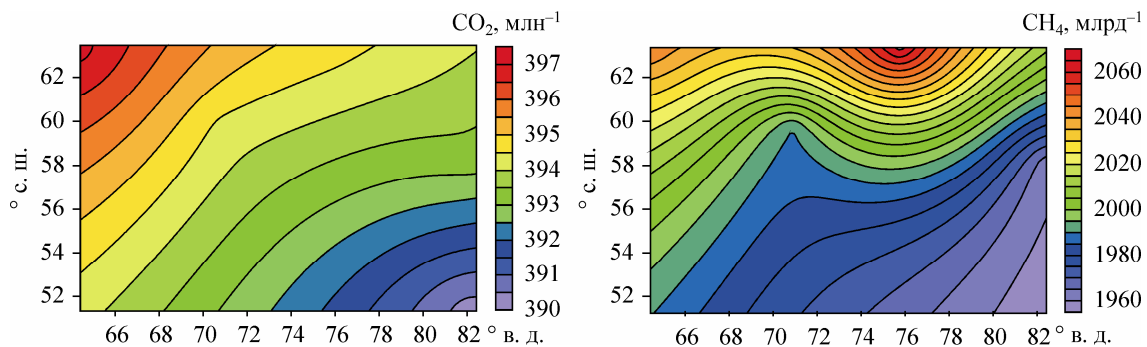


Рис. 23. Пространственное распределение углекислого газа и метана для территории Западной Сибири.