

# Кинетика ионизации и рекомбинации атмосферного натрия

Н.И. Косарев\*

Сибирский юридический институт ФСКН РФ  
660131, г. Красноярск, ул. Рокоссовского, 20

Поступила в редакцию 19.03.2013 г.

Рассчитаны характерные времена фотоионизации с основного  $3S$ - и возбужденного  $3P$ -состояний атома натрия. Построена модель балансных уравнений кинетики ионизации и рекомбинации атмосферного натрия в оптически тонком случае, на основе экспериментальной схемы реакций образования комплексных ионов с участием натрия, которая учитывает и фотопроцессы для основного и возбужденного его уровней. Численное решение уравнений баланса описывает динамику плотности атомов натрия, ионов натрия и комплексных ионов  $\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}^+\text{N}_2$  и  $\text{Na}^+\text{CO}_2$  при учете лазерной подсветки на резонансном переходе с длиной волны 0,589 мкм.

*Ключевые слова:* атмосферный натрий, кинетика, фотоионизация, фотовозбуждение, рекомбинация, лазерно-индуцированный; atmospheric sodium, kinetics, photoionization, photoexcitation, recombination, laser-induced.

## Введение

В нижней ионосфере Земли у основания области  $E$  полученные в ракетных экспериментах данные указали на наличие слоя, в котором присутствуют ионы таких химических элементов, как Mg, Ca, Fe, Na, Si [1, 2]. Их возникновение там объясняется испарением метеоров, нагреваемых при падении в земной атмосфере. Результаты спектрального анализа вещества метеорных остатков свидетельствуют, что кроме этих элементов в них присутствуют H, O<sub>2</sub>, As, Cr, Ni и др. Однако наряду с космическим наличием слоя металлических ионов связывают и с земным происхождением. Например, анализ корреляции плотности натрия в верхней атмосфере и над поверхностью океана позволяет предположить о вертикальном переносе атомов с его поверхности. Вопрос о том, какой из механизмов образования слоя металлических ионов доминирует, является дискуссионным и до конца не исследован.

Среди такого большого количества химических элементов, присутствующих в земной атмосфере, наиболее полные данные о высотном профиле плотности и других параметрах получены для натрия и калия [1]. Что касается натрия, то ввиду относительно большой его концентрации в атмосфере по отношению к другим элементам он может играть значительную роль в химических реакциях и в излучательных свойствах нижней ионосферы Земли. Кроме того, интерес к натрию вызван практическим применением резонансной флуоресценции на переходе  $3S \leftrightarrow 3P$  с длинами волн  $\lambda_{1,2} = 0,589$  и  $0,5896$  мкм в системах адаптивной оптики для учета компенса-

ции атмосферных искажений, что первыми предложили авторы [3, 4].

Развитие технологий лазерных источников света применительно к резонансным линиям атмосферного натрия, сложившееся к концу XX в., весьма полно описано, например, в работе [5], а в [6] содержится большой список источников, достаточный для того, чтобы охарактеризовать состояние данной проблемы в целом, в том числе и в начале XXI в. Экспериментальные исследования атмосферного натрия касаются сезонной вариации в высотном распределении его концентрации и температуры в различных географических широтах [7–9], оценки корреляции концентрации атомов в зависимости от метеорной активности в земной атмосфере [10], анализа химических и физических реакций в мезосфере с участием натрия и др. [6, 8]. Опытным путем также обнаружено наличие сильных вертикальных градиентов различных химических реакций, влияющих на кинетику нейтрального натрия. Ввиду этого были построены модели, учитывающие сезонную динамику в вертикальном распределении натрия и влияние на нее различных молекулярных компонент и комплексных ионов в вышеназванной области [11, 12].

Вопросы оптической накачки резонансных линий натрия инициированы исследованием эффективности лидарных систем, использованных при создании лазерных натриевых звезд [5, 10]. Так, авторы работы [13] анализируют возможные причины снижения эффективности рассеянного атомами натрия оптического сигнала при воздействии на них лазерным излучением с частотной шириной, сравнимой с естественной шириной линии натрия. В таких условиях построение наиболее полной модели взаимодействия лазерного поля с атомным ансамблем требует учета эффектов давления фотонов на атомы

\* Николай Иванович Косарев (kosarev\_nikolai@mail.ru).

и ларморовского вращения электронов в магнитном поле Земли, что оказывается возможным только с привлечением аппарата матрицы плотности. Если же предположить воздействие на резонансный переход лазерным импульсом с частотной шириной, сравнимой или больше доплеровской ширины линии, и с длительностью, превышающей естественное время жизни атомов в возбужденном состоянии, то все вышеназванные эффекты можно не принимать во внимание. Тогда для анализа состояния газа в поле лазерного излучения можно воспользоваться скоростными уравнениями баланса населенностей. Именно уравнения химической и фотокинетики, учитывающие процессы молекулярных столкновений натрия с окружающими его молекулами воздуха и фотопротекции под действием солнечного и лазерного излучения, взяты за основу в представленной работе. Путем численного решения этих уравнений исследуются процессы ионизации и рекомбинации атмосферного натрия.

## 1. Фотоионизация атомов натрия

Известно, что слой атомарного натрия толщиной  $L_0 \approx 10$  км находится на высоте  $h \approx 92$  км и имеет концентрацию  $N_0 = 10^2 \div 10^3 \text{ см}^{-3}$  [1], что находится в согласии с данными более новых исследований [6, 9, 10]. В дневное время суток атомы могут быть ионизованы солнечным светом. Кроме фотоионизации будут протекать и процессы фотовозбуждения атомов на высоколежащие уровни. Оценим вероятность спонтанного распада возбужденного состояния для резонансного перехода  $3S \leftrightarrow 3P$  с длиной волны  $\lambda_{12} = 0,589$  мкм. По формуле [14]:

$$A_{21} = 6,66 \cdot 10^{13} g_1 / (g_2 \cdot \lambda_{21}^2) f_{12},$$

подставляя в нее значения для силы осцилляторов двоятого  $3P_{1/2,3/2}$  резонансного перехода  $f_{12} = 0,978$ , длины волны  $\lambda_{12}$  в нанометрах и статвесов  $g_1 = 2$ ,  $g_2 = 6$  уровней 1 и 2 атома натрия, получим значение  $A_{21} = 6,27 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ . При этом частота фотовозбуждения данной линии под действием солнечного излучения с освещенностью в интегральном спектре  $S_\lambda = 17,9 \cdot 10^9 \text{ эрг}/(\text{см}^{-2} \cdot \text{с} \cdot \text{см})$  [15] составляет  $B_{12} S_\lambda = 200 \text{ с}^{-1}$ . Из приведенных расчетов следует, что плотность атомов в возбужденном состоянии на много порядков меньше, чем в основном, и их фотоионизация будет протекать именно из основного уровня.

Рассчитаем теперь частоты фотоионизации с основного и возбужденного состояний натрия. Из [16] для частоты фотоионизации  $\alpha_{\text{ф},1}$ , соответствующей основному уровню атома натрия (рис. 1), можем написать выражение

$$\alpha_{\text{ф},1} = - \int_{\nu_1}^{\infty} c \sigma_{\nu,1}(\nu) \frac{U_\nu}{h\nu} d\nu, \quad (1)$$

в котором  $U_\nu d\nu$  — количество лучистой энергии на частоте  $\nu$  в спектральном диапазоне  $d\nu$  в  $1 \text{ см}^3$  (спек-

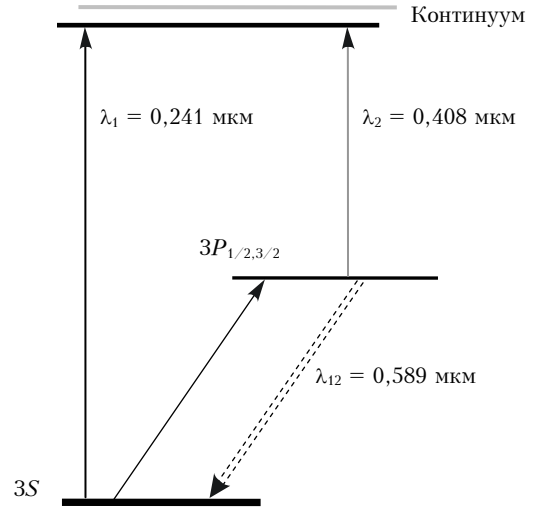


Рис. 1. Упрощенная модель атома натрия

тральная плотность);  $\sigma_{\nu,1}$  — эффективное сечение фотоионизации;  $h\nu$  — энергия кванта;  $\nu_1$  — пороговая частота фотоионизации (для атома натрия она соответствует длине волны  $\lambda_1 = 0,241$  мкм, рис. 1);  $c$  — скорость света. Последний интеграл находился численно по методу трапеций с учетом, что  $I_\nu = cU_\nu$ , а в справочнике по распределению интенсивности в солнечном спектре [15] дается освещенность  $S_\lambda$ , которая связана с  $I_\nu$  соотношением  $I_\nu = S_\lambda c / \nu^2$ . Для эффективного сечения фотоионизации с основного уровня натрия использовалась зависимость  $\sigma_{\nu,1}(\nu) = \sigma_{\nu,1}^0 \left( \frac{\nu_1}{\nu} \right)^3$  с  $\sigma_{\nu,1}^0 = 0,31 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$  [17]. В итоге для частоты фотоионизации  $\alpha_{\text{ф},1}$  получено значение  $5,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  и, соответственно, для характерного времени фотоионизации  $\tau_{\text{ф},1} = (\alpha_{\nu,1})^{-1} = 18165 \text{ с}$ .

Для того чтобы рассчитать частоту фотоионизации с возбужденного уровня  $3P$ , необходимо найти зависимость его эффективного сечения фотоионизации от частоты. Эта зависимость была получена методом квантового дефекта [18]. Величина сечения на пороговой длине  $\lambda_2 = 0,408$  мкм (рис. 1) оказалась равной  $7,4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ . Отметим, что полученное значение порогового сечения неплохо согласуется с данными других авторов. Так, в работе [19] приводятся пороговые сечения фотоионизации с уровня  $3P$  атома натрия по данным различных авторов. Их величина варьируется от  $7,38 \cdot 10^{-18}$  до  $7,7 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ . Вычисленное нами пороговое значение эффективного сечения попадает внутрь данного интервала.

Частота фотоионизации  $\alpha_{\nu,2}$  с уровня  $3P$  рассчитывалась численно с использованием формулы (1) и распределения солнечной освещенности  $S_\lambda$  [15] в области спектра, соответствующего фотоионизации с уровня  $3P$  натрия. В итоге для  $\alpha_{\nu,2}$  получено значение  $0,102 \text{ с}^{-1}$  и для времени фотоионизации  $\tau_{\text{ф},2} = (\alpha_{\nu,2})^{-1} = 9,8 \text{ с}$ .

С одной стороны, как видим, время фотоионизации с уровня  $3P$  значительно меньше времени фотоионизации с основного уровня. Это связано с тем,

что эффективное сечение первого более чем в 20 раз больше, а интенсивности солнечного света на длинах волн, близких к пороговой  $\lambda_2 = 0,408$  мкм, примерно на 2 порядка превосходят интенсивности, соответствующие длине волны 0,241 мкм. Хотя, с другой стороны, следует ожидать, что ввиду малого заселения возбужденного уровня  $3P$  солнечным светом фотоионизация с этого уровня будет пренебрежимо мала по сравнению с фотоионизацией с основного состояния, характерное время которого составляет  $\tau_{ф,1} = 18165$  с. Это равно примерно 5 ч дневного времени суток. Следовательно, процесс ионизации атомов натрия солнечным светом является малоэффективным с точки зрения основного механизма образования фотоионов натрия в нижней ионосфере Земли. Поэтому следует искать другие наиболее действенные механизмы ионизации и рекомбинации натрия в дневное время суток.

## 2. Кинетика ионизации и рекомбинации натрия

Как указывалось во введении, к настоящему времени детально исследованы химические и физические процессы, протекающие в мезосфере с участием атомов натрия, влияющие на динамику сезонного изменения распределения натрия в вертикальном направлении. Тем не менее в работах [3–12] не приводятся полные данные о скоростных коэффициентах реакций, протекающих с участием натрия. В связи с этим наиболее полезной с точки зрения моделирования кинетики ионизации и рекомбина-

ции атмосферного натрия оказывается работа [20], в которой содержится схема, воспроизведенная на рис. 2. На этой схеме отображены результаты многих экспериментов, в которых без учета сезонного изменения вертикального распределения концентрации натрия [7–10] исследовались реакции с образованием комплексных ионов при участии атомов и ионов натрия. Более того, здесь же указаны и времена соответствующих процессов. Экспериментальные данные [20] свидетельствуют, что основными ионами натрия являются  $\text{NaO}^+$  и  $\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}$ , а максимальная их концентрация на высоте около 90 км достигает  $10^2 \text{ см}^{-3}$ .

Анализ рис. 2 показывает, что основным механизмом ионизации атомов натрия является их столкновение с молекулами  $\text{O}_2^+$  и  $\text{N}_2^+$  с характерным временем этой реакции 5600 с, что почти в 3 раза меньше характерного времени фотоионизации нормальных атомов. Рекомбинация молекул  $\text{Na}^+\text{CO}_2$  и  $\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}$  происходит в электронных столкновениях за 200 с. Однако образование этих комплексных ионов проходит в основном в парных столкновениях иона натрия с молекулой  $\text{N}_2$  за 800 с и в трехчастичных столкновениях  $\text{Na}^+$  с молекулами  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  за 2000 с. Поэтому за основной механизм, определяющий рекомбинацию ионов натрия, согласно рис. 2, может быть принята реакция с участием молекулы азота  $\text{N}_2$  с характерным временем 800 с.

Итак, минимальное время рекомбинации ионов натрия может составлять 800 с.

Прежде чем моделировать кинетику фотовозбуждения, фотоионизации и рекомбинации натрия, рассчитаем оптическую толщину слоя на переходе

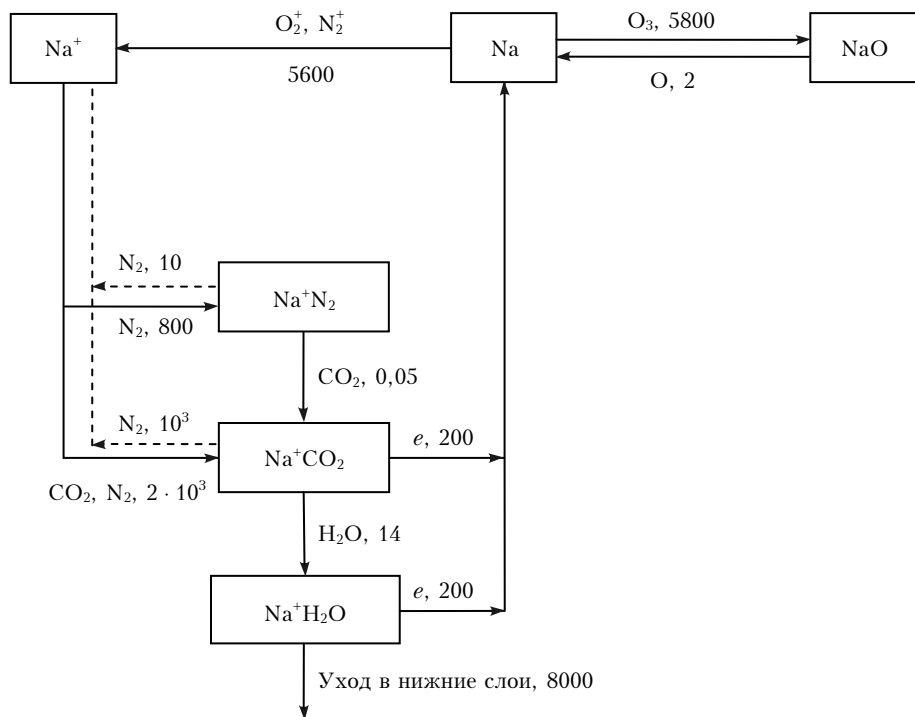


Рис. 2. Реакции с образованием комплексных ионов, в которых участвуют атомы и ионы натрия, по данным работы [20]. У стрелочек указаны взаимодействующие с натрием частицы и времена соответствующих процессов

$S \leftrightarrow 3P$  с длиной волны  $\lambda_{12} = 0,589$  мкм. Воспользовавшись формулой [14] для доплеровского контура линии, имеем

$$\chi_0 = 2\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\pi e^2}{m_0 c} \frac{f_{12}}{\Delta\nu_D} N_0,$$

где  $e$  и  $m_0$  — заряд и масса электрона;  $f_{12}$  — сила осцилляторов перехода 1–2;  $\Delta\nu_D$  — доплеровская ширина линии поглощения атомов;  $N_0$  — концентрация атомов натрия в рассматриваемой нами области ионосферы Земли. При температуре среды  $T = 200$  К доплеровская ширина  $\Delta\nu_D = 0,642 \cdot 10^9$  Гц. Подставляя в выражение для  $\chi_0$  силу осцилляторов сдвоенного перехода  $f_{12}$  и все остальные мировые константы, получим для  $\chi_0$  выражение  $\chi_0 = 0,04 \cdot 10^{-5} N_0$ . По данным [1–10], концентрация атмосферного натрия с учетом его сезонного изменения может достигать величин  $N_0 \approx 10^3 - 10^4$  см $^{-3}$ . Если взять для  $N_0$  наибольшее значение  $10^4$  см $^{-3}$  и перейти к оптической толщине слоя атомарного натрия  $\tau_0$ , то можем получить для нее значение  $\chi_0 L_0 = 0,4$ . Таким образом, оптическая толщина атмосферного натрия меньше единицы и, следовательно, кинетику его ионизации и рекомбинации можно описывать в рамках модели оптически тонкого слоя.

В соответствии с рис. 2 была построена модель балансных уравнений, включающая все частицы, участвующие в реакциях с натрием, кроме молекулы NaO. Время ее образования в столкновениях натрия с молекулой O $_3$  равно 5800 с, что много больше времени (равного 2 с, рис. 2) обратной реакции, протекающей между молекулой NaO и атомом кислорода. Поэтому диссоциация молекул NaO будет практически мгновенно истощать резервуар с окисью натрия, а все атомы Na возвращать в исходное состояние. Кроме образования комплексных ионов модель учитывала фотовозбуждение 3P-состояния солнечным светом, фотоионизацию атомов натрия с основного и возбужденного уровней. Для оптически тонкого случая кинетика рассматриваемого процесса описывалась системой скоростных уравнений баланса следующего вида:

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{Na}]_1}{dt} = & -(\alpha_{v1} + \alpha_{\text{Na}, \text{O}_2^+, \text{N}_2^+} + B_{12}J_{12})[\text{Na}]_1 + \\ & + (B_{21}J_{21} + A_{21})[\text{Na}]_2 + \alpha_{\text{Na}^+\text{CO}_2, e}[\text{Na}^+\text{CO}_2] + \\ & + \alpha_{\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}, e}[\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{Na}]_2}{dt} = & -(\alpha_{v2} + \alpha_{\text{Na}, \text{O}_2^+, \text{N}_2^+} + B_{21}J_{21} + A_{21})[\text{Na}]_2 + \\ & + B_{12}J_{12}[\text{Na}]_1, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{Na}]_+}{dt} = & -(\alpha_{\text{Na}^+, \text{N}_2} + \alpha_{\text{Na}^+, \text{CO}_2, \text{N}_2})[\text{Na}]_+ + \\ & + (\alpha_{v1} + \alpha_{\text{Na}, \text{O}_2^+, \text{N}_2^+})[\text{Na}]_1 + (\alpha_{v2} + \alpha_{\text{Na}, \text{O}_2^+, \text{N}_2^+})[\text{Na}]_2 + \\ & + \alpha_{\text{Na}^+\text{N}_2, \text{N}_2}[\text{Na}^+\text{N}_2] + \alpha_{\text{Na}^+\text{CO}_2, \text{N}_2}[\text{Na}^+\text{CO}_2], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{Na}^+\text{N}_2]}{dt} = & -(\alpha_{\text{Na}^+\text{N}_2, \text{N}_2} + \alpha_{\text{Na}^+\text{N}_2, \text{CO}_2})[\text{Na}^+\text{N}_2] + \\ & + \alpha_{\text{Na}^+, \text{N}_2}[\text{Na}]_+, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{Na}^+\text{CO}_2]}{dt} = & -(\alpha_{\text{Na}^+\text{CO}_2, \text{N}_2} + \alpha_{\text{Na}^+\text{CO}_2, e} + \alpha_{\text{Na}^+\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}}) \times \\ & \times [\text{Na}^+\text{CO}_2] + \alpha_{\text{Na}^+, \text{CO}_2, \text{N}_2}[\text{Na}]_+ + \alpha_{\text{Na}^+\text{N}_2, \text{CO}_2}[\text{Na}^+\text{N}_2], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}]}{dt} = & -(\alpha_{\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}, e} + \alpha_{\text{выход}})[\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}] + \\ & + \alpha_{\text{Na}^+\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}}[\text{Na}^+\text{CO}_2], \end{aligned} \quad (7)$$

где в квадратных скобках обозначены плотности соответствующих компонентов:  $[\text{Na}]_1$  — плотность атомов в основном состоянии 3S;  $[\text{Na}]_2$  — плотность атомов в возбужденном состоянии 3P;  $[\text{Na}]_+$  — плотность ионов натрия;  $[\text{Na}^+\text{N}_2]$ ,  $[\text{Na}^+\text{CO}_2]$  и  $[\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}]$  — плотности комплексных ионов Na $^+\text{N}_2$ , Na $^+\text{CO}_2$  и Na $^+\text{H}_2\text{O}$  соответственно;  $B_{12}J_{12}$  — частота фотовозбуждения;  $B_{21}J_{21}$  — частота девозбуждения уровня 3P атома натрия под действием солнечной радиации;  $\alpha_{v1}$  — частота фотоионизации с основного уровня;  $\alpha_{v2}$  — частота фотоионизации с возбужденного уровня натрия;  $\alpha_{\text{выход}}$  — частота ухода комплексных ионов Na $^+\text{H}_2\text{O}$  в нижние слои;  $\alpha_{\text{Na}, \text{O}_2^+, \text{N}_2^+}$  — частота ионизации натрия при столкновениях с молекулярными ионами O $_2^+$  и N $_2^+$ ;  $\alpha_{\text{Na}^+\text{CO}_2, e}$  — частота рекомбинации комплексного иона Na $^+\text{CO}_2$  при столкновении с электронами;  $\alpha_{\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}, e}$  — частота рекомбинации комплексного иона Na $^+\text{H}_2\text{O}$  при столкновении с электронами и т.д. Уравнения (2)–(7) были дополнены начальными условиями

$$\begin{aligned} N_{\text{Na}}(t_0) = N_0, \quad N_{\text{Na}^+}(t_0) = 0, \quad N_{\text{Na}^+\text{N}_2}(t_0) = 0, \\ N_{\text{Na}^+\text{CO}_2}(t_0) = 0, \quad N_{\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}}(t_0) = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

соответствующими тому, что в момент времени  $t_0 = 0$  плотность атомарного натрия составляет  $N_0$ , а комплексных ионов нет. Построенная система уравнений (2)–(7) с начальными условиями (8) решалась численно.

### 3. Результаты численного моделирования

Кинетика поведения плотности нейтрального натрия, иона натрия и комплексного иона Na $^+\text{H}_2\text{O}$  показана на рис. 3 штриховыми кривыми. Значения населенности этих компонент выходят на стационарные значения 0,87; 0,1 и 0,035 соответственно. Плотности молекулярных ионов Na $^+\text{N}_2$  и Na $^+\text{CO}_2$ , как показали расчеты, гораздо меньше плотности иона Na $^+\text{H}_2\text{O}$ . Поэтому, ввиду малости их значений, на рис. 3 не отображена кинетика поведения от времени плотности этих компонентов.

Результаты расчетов также показали, что учет в модели процессов фотовозбуждения солнечным светом состояния 3P и фотоионизации уровней 3S и 3P

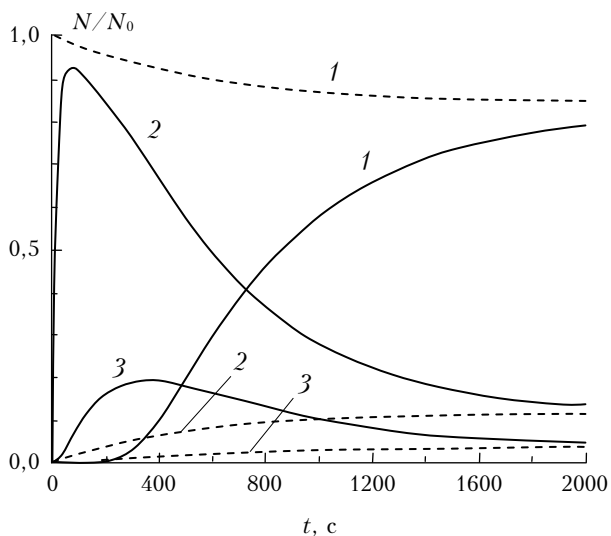


Рис. 3. Динамика концентрации атомов натрия (кривая 1), ионов натрия (2), комплексных ионов  $\text{Na}^+\text{H}_2\text{O}$  (3), нормированные на  $N_0$  (штриховые кривые). Сплошными кривыми изображены концентрации тех же самых компонентов при лазерном фотовозбуждении резонансного перехода с  $\lambda_{12} = 0,589$  мкм. По оси ординат — концентрации соответствующих частиц  $N$  нормированы на начальную концентрацию атомов натрия  $N_0 = 10^2 \text{ см}^{-3}$

не приводит к существенному изменению населенности всех вышеназванных компонентов. Данный вывод можно было сделать при анализе полученных в разд. 1 соответствующих этим уровням частот фотовозбуждения и фотоионизации. Результаты численных расчетов, по существу, подтверждают монополюсное влияние схемы, приведенной на рис. 2, на кинетику ионизации и рекомбинации атмосферного натрия, поскольку населенность основного состояния  $3S$  значительно больше населенности возбужденного  $3P$ -уровня. Населенность последнего можно было бы значительно увеличить, используя лазерное излучение с длительностью, превосходящей характерное время ионизации возбужденного состояния  $3P$  в натрии. В соответствии с вышесказанным моделировалось воздействие на резонансный переход лазерным излучением вида

$$I_{\lambda}(v, t) = I_0 \frac{(\Delta v_{\lambda}/2)^2}{(v - v_{\lambda})^2 + (\Delta v_{\lambda}/2)^2} \frac{t}{\tau_{\text{имп}}} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_{\text{имп}}}\right), \quad (9)$$

где  $\tau_{\text{имп}}$  — длительность импульса;  $I_0$  — интенсивность;  $\Delta v_{\lambda}$  — частотная ширина лазерного излучения. Использовались следующие значения для  $\tau_{\text{имп}} = 40$  с, для  $I_0 = 5 \text{ Вт/см}^2$ , а  $\Delta v_{\lambda} = 100\Delta v_D$ . При таких параметрах частотная ширина лазерного излучения превышала расстояние между линиями  $3P_{1/2}$  и  $3P_{3/2}$ , и, следовательно, их с хорошей точностью можно считать одним двоянным переходом.

Результаты расчетов кинетики поведения соответствующих компонент показаны на рис. 3 сплошными кривыми. Их поведение показывает, что при воздействии на резонансный переход атома натрия лазерным излучением большой длительности (боль-

шей  $\tau_{\text{ф},2}$ ), его населенность значительно возрастает. Это приводит к эффективной ионизации атомов натрия под действием солнечного света, поскольку длительность импульса больше характерного времени фотоионизации с этого уровня, которое составляет 9,8 с. Тем не менее не получено полной ионизации натрия под действием лазерного излучения. Это объясняется реакцией парного столкновения иона натрия с молекулой  $\text{N}_2$  и реакцией тройного столкновения  $\text{Na}^+$  с молекулами  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$ . Поэтому некоторая часть ионов натрия рекомбинирует и постоянно пополняет резервуар с нейтральным натрием. После уменьшения лазерной интенсивности, в соответствии с его временной формой, заданной уравнением (9), ионы натрия рекомбинируют и их плотности, так же как и плотности всех остальных компонентов, сходятся к своим стационарным величинам (штриховые кривые на рис. 3).

На рис. 4 приводятся результаты моделирования кинетики лазерно-индуцированного возбуждения резонансной линии  $\lambda_{12} = 0,589$  мкм при его длительности много меньше характерного времени фотоионизации уровня  $3P$  ( $\tau_{\text{имп}} = 0,1$  с).

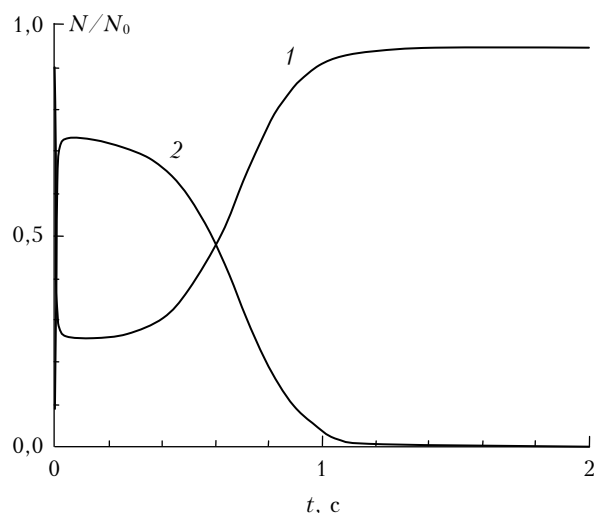


Рис. 4. Кинетика поведения концентрации атомов натрия в основном  $3S$ - (кривая 1) и возбужденном  $3P$ - (кривая 2) состояниях при воздействии резонансным излучением  $\tau_{\text{имп}} = 0,1$  с и  $I_0 = 10 \text{ Вт/см}^2$ . По оси ординат концентрации соответствующих частиц нормированы на начальную концентрацию атомов натрия  $N_0 = 10^2 \text{ см}^{-3}$

Несмотря на то что при указанных выше параметрах лазерного излучения с интенсивностью  $I_0 = 5 \text{ Вт/см}^2$  прослеживается тенденция к насыщению резонансного перехода, за время воздействия импульсом процесс фотоионизации с уровня  $3P$  не успевает развиваться и по мере спада лазерной интенсивности населенность возбужденного состояния (кривая 2) уменьшается за счет спонтанного распада этого уровня в основное состояние  $3S$ . Итак, соотношением нейтральных и ионизованных атомов натрия, находящихся в мезосфере Земли, можно управлять, меняя длительность лазерного излучения путем фотовозбуждения резонансной линии  $3S \leftrightarrow 3P$ .

## Заключение

Итак, обсудим справедливость построенной модели и полученных на ее основе численных результатов. При обзоре теоретических исследований физико-химических процессов, протекающих в слое мезосферного натрия, наибольший интерес вызвала работа [12]. Ее автор разработал одномерную численную модель динамики вертикального распределения плотности натрия путем ввода в уравнения непрерывности для концентрации нейтрального натрия функцию притока атомов посредством абляции метеоритов, сгорающих в земной атмосфере. Убыль натрия в этой модели осуществляется путем конденсации димера ( $\text{NaHCO}_3$ )<sub>2</sub>, в который путем последовательных реакций попадают нейтральные атомы, и последующего его оседания в нижние слои атмосферы в виде метеорных частиц. В настоящей модели скоростных уравнений (2)–(8) не учитывается сезонное изменение в вертикальном профиле распределения натрия, а используется усредненное по высоте значение его концентрации. Следует также отметить, что в работе [12] приведен более подробный по сравнению с монографией [20] список ионно-молекулярных реакций с участием натрия и скоростные коэффициенты соответствующих процессов на основе обзора наиболее новых, чем в [20], экспериментальных данных. При этом реакции, обозначенные на рис. 2, содержатся и в списке реакций [12], но их скоростные коэффициенты гораздо превосходят последние. Следовательно, реакции схемы (см. рис. 2) превалируют над остальными, учет которых в построенной модели (2)–(8) не приведет к сколько-нибудь значительному изменению населенности компонент, соответствующих рис. 2.

Основные выводы и результаты работы состоят в следующем.

1. Рассчитаны характерные времена фотоионизации атома натрия с основного  $3S$ - и возбужденного  $3P$ -состояний. Для возбужденного  $3P$ -уровня сечение фотоионизации рассчитано методом квантового дефекта. При этом значение порогового сечения хорошо согласуется с данными других авторов.

2. Построена модель скоростных уравнений баланса химической и фотокинетики атомарного натрия. За основу взята экспериментальная схема реакций с участием комплексных ионов натрия и молекулярных ионов, присутствующих в нижней ионосфере. Модель также учитывает процессы фотовозбуждения и фотоионизации атома натрия солнечным и лазерным излучением.

3. Показано, что в дневное время суток более 80% мезосферного натрия находится в атомарном состоянии, но к значительному перераспределению концентрации между атомами и ионами натрия может привести фотовозбуждение лазерным излучением резонансного перехода с длиной волны 0,589 мкм и длительностью, превышающей характерное время фотоионизации этого состояния. Из этого следует, что в сумеречных условиях можно наблюдать флуоресценцию на ионах натрия при воздействии на резонансный атомный переход лазерным импульсом

большой длительности, при котором развивается фотоионизация атомов.

4. На ионном резонансном переходе мезосферного натрия можно получить и лазерно-индуцированную флуоресценцию в ночное время суток путем ступенчатого фотовозбуждения натрия, а затем его фотоионизацией лазерными импульсами.

Следует также отметить, что модель скоростных уравнений баланса химической и фотокинетики, построенная нами, может иметь дальнейшее развитие с учетом последних экспериментальных и теоретических достижений в данной области исследований.

1. *Атмосфера*: Справочник. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 509 с.
2. *Бауэр З.* Физика планетных ионосфер. М.: Мир, 1976. 251 с.
3. *Foy R., Labeyrie A.* Feasibility of adaptive telescope with laser probe // *Astron. Astrophys.* 1985. V. 152. L29.
4. *Thompson L.A., Gardner C.S.* Experiments on laser guide stars at Mauna Kea Observatory for Adaptive Imaging in Astronomy // *Nature (Gr. Brit.)*. 1987. V. 328, N 6127. P. 229.
5. *Jeys T.H.* Development of a mesospheric sodium laser beacon for atmospheric adaptive optics // *The Lincoln laboratory journal*. 1991. V. 4, N 2. P. 133–150.
6. *Plane J.M.C.* A reference atmosphere for the atomic sodium layer. 2009. 26 p. [Электронный ресурс]. URL: [http://spaceweather.usu.edu/files/uploads/PDF/Na\\_Reference%20Atmosphere-revised.pdf](http://spaceweather.usu.edu/files/uploads/PDF/Na_Reference%20Atmosphere-revised.pdf) (дата обращения: 16.05.2013).
7. *Gardner Ch.S., Plane J.M.C., Pan W., Vondrak T., Murray B.J., Xinzhao Chu.* Seasonal variations of the Na and Fe layers at the South Pole and their implications for the chemistry and general circulation of the polar mesosphere // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, D10302, doi: 10.1029/2004JD005670.
8. *Plane J.M.C.* Atmospheric chemistry of meteoric metals // *Chem. Rev.* 2003. V. 103, iss. 12. P. 4963–4984.
9. *Fan Z.Y., Plane J.M.C., Gumbel J., Stegman J., Llewellyn E.J.* Satellite measurements of the global mesospheric sodium layer // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 15. P. 4107–4115.
10. *Dunker T., Hoppe U.-P., Stober G., Rapp M.* Development of the mesospheric Na layer at 69°N during the Geminids meteor shower 2010 // *Ann. Geophys.* 2013. V. 31. P. 61–73.
11. *Helmer M., Plane J.M.C.* A study of the reaction  $\text{NaO}_2^+ \text{O} \rightarrow \text{NaO}^+ \text{O}_2$ : implications for the chemistry of sodium in the upper atmosphere // *Geophys. Res.* 1993. V. 98, N 12. P. 23207–23222.
12. *Plane J.M.C.* A time-resolved model of the mesospheric Na layer: constraints on the meteor input function // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4, N 3. P. 627–638, doi: 10.5194/acp-4-627-2004.
13. *Kibblewhite E.* The physics of the sodium laser guide star: predicting and enhancing the photon returns. 2009. 9 p. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2009/Adaptive\\_Optics/Kibblewhite.pdf](http://www.amostech.com/TechnicalPapers/2009/Adaptive_Optics/Kibblewhite.pdf) (дата обращения: 16.05.2013).
14. *Спектроскопия газоразрядной плазмы* / Под ред. С.Э. Фриша. Л.: Наука, 1970. 372 с.
15. *Макарова Е.А., Харитонов А.В.* Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная. М.: Наука, 1972. 288 с.
16. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.

17. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
18. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Наука, 1977. 320 с.
19. Aymar M., Luc-Koenig E., Combet Farnoux F. Theoretical investigation on photoionization from Rydberg states of lithium, sodium and potassium // J. Phys. B. 1976. V. 9, N 8. P. 1279–1291.
20. Смирнов Б.М. Комплексные ионы. М.: Наука, 1983. 152 с.

*N.I. Kosarev. Ionization and recombination kinetics of the atmospheric sodium.*

The characteristic times of photoionization of the ground  $3S$  level and excited  $3P$  one of the sodium atom are calculated. The model of the balance equations of the ionization and recombination kinetics was constructed for optically thin case, based on the experimental scheme of reactions of the complex ion formation with participation of sodium, which considers also photoprocesses for the basic and excited levels. The numerical solution of the balance equations gives the time behavior of the sodium atomic density, ionic density, and complex ionic density when taking into account the laser illumination of the resonant transition at a wavelength of  $0.589 \mu\text{m}$ .