

7. *Мартirosян Р. П.* Влияние дилатансии на взаимодействие жесткого фундамента с сейсмическими упругопластическими волнами сдвига. Реф. сб.: Сейсмостойкое строительство. М., 1981, вып. 4, с. 22—26.
8. *Назаров А. Г., Антоненко Э. М., Кац А. З., Коган Л. А., Лямзина Г. А., Лыкошин А. Г., Напетваридзе Ш. Г., Пирузян С. А., Трофименков Ю. Г.* К проблеме сейсмического микрорайонирования. Бюллетень по инженерной сейсмологии, № 7, Ереван: Изд. АН Арм. ССР, 1972, с. 11—24.
9. *Николаевский В. М.* Механические свойства грунтов и теория пластичности. Итоги науки и техники. Механика твердых деформируемых тел. ВНИИТИ, 1972, т. 6, —86 с.
10. *Пирузян С. А.* К вопросу влияния микрогеологии на величину силы сотрясения по данным Гегечкорского землетрясения 1957 г.—Изв. АН АрмССР, техн. науки, 1957, т. X, № 6, с. 68—73.
11. *Пирузян С. А.* Метод уточнения исходной сейсмической балльности для целей микрорайонирования и детального сейсморайонирования.—В кн.: Материалы республик. научно-техн. конференции молодых ученых. Ереван: Лубс, 1967, с. 123—146.
12. *Пирузян С. А.* Метод определения сейсмических воздействий на сооружения по записям сильных и слабых землетрясений для целей микросейсморайонирования. Бюллетень по инженерной сейсмологии, № 6, 1970, с. 75—82.
13. *Пучков С. В.* Закономерности колебаний грунта при землетрясениях.—М.: Наука, 1974, 119 с.
14. *Ратникова Л. Н., Штейнберг В. В., Шебалин Н. В., Пирузян С. А., Аракелян Ф. О.* Оценка сейсмической опасности района строительства электростанции. В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 18, М., Недра, 1976, с. 41—61.
15. *Рахматулин Х. А., Сагомоян А. Д., Алексеев А. А.* Вопросы динамики грунтов. М.: 1964, 362 с.
16. Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1977, 248 с.
17. Niigata Earthquake of 1964. Japan Committee on Earthquake Engineering, p.p. 18.

Известия АН АрмССР, Науки о Земле, XL, № 4, 51—61, 1987

УДК: 556.552 (479.25) + 551.576

Г. Р. ТОРОЯН, В. И. ХВОРОСТЬЯНОВ

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОРОГРАФИЧЕСКИЕ ОБЛАКА С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ОСАДКОВ В БАССЕЙНЕ ОЗ. СЕВАН

С помощью двумерной нестационарной математической модели исследованы микрофизические поля орографических облаков и осадков в естественных условиях и при засеве с помощью наземных и приподнятых аэрозольных генераторов, имитирующих воздействия на облака в бассейне озера Севан. Исследовано пространственно-временное распределение интенсивности и сумм осадков при различных расположениях и мощностях генераторов. Оценены интегральные суммы выпадающих осадков до и после препятствия.

Введение. Одним из способов решения проблемы по сохранению уровня озера Севан является воздействие на зимние орографические облака с целью увеличения осадков в бассейне озера. Согласно исследованиям [4] в зимних условиях при обтекании южным и юго-западным потоками Гегамского хребта как с наветренной стороны, так и за хребтом над Севаном образуются стабильные орографические облака Sc—Ac. Эти облака переохлажденные, капельные и пригодны к воздействию для увеличения осадков в бассейне озера. Одним из способов воздействия на эти облака является, например, засеив твердой углекислотой с самолета [4]. Моделирование такого засева проводилось в предыдущих работах авторов [9, 10]. Однако применение самолетного засева облаков в горных районах часто ограничено правилами техники безопасности полетов. Другой способ воздействия, достаточно эффективный и простой—это засеив орографических облаков с помощью наземных и приподнятых аэрозольных генераторов [2, 3, 11, 12].

При этом, для оптимального размещения генераторов необходимо детально исследовать: 1) мезо- и микроструктуру облаков; 2) их водо-запас; 3) закономерности распространения льдообразующих аэрозолей при сложной структуре динамики обтекания препятствия; 4) взаимодействие реагента с облаком и т. д. Эффективным методом изучения этих процессов является математическое моделирование.

В данной работе представлена двумерная нестационарная модель засева орографических облаков с помощью наземных аэрозольных генераторов. Моделируя засев на различных удалениях от хребта, можно приближенно оценить сумму осадков, выпадающих с наветренной стороны и поступающих в Разданский каскад, и сумму осадков с подветренной стороны, поступающих в Севан.

Насколько можно увеличить осадки с наветренной стороны, настолько же можно уменьшить сток из Севана в Разданский каскад, т. е. увеличение осадков как с наветренной стороны, так и с подветренной внесет положительный вклад в решение проблемы по сохранению оз. Севан.

Постановка задачи. Для определения горизонтальных и вертикальных составляющих скорости ветра решалось волновое уравнение Гельмгольца для возмущения функции тока ψ' [8, 9, 10]:

$$\Delta\psi' + \left(\frac{g\alpha}{c_0^2} + \frac{\beta}{T} \right) \psi' + k^2 \psi' = 0 \quad (1)$$

где $\psi' = \psi - u_0 z$; u_0 — горизонтальная скорость натекающего потока; $k^2 = \frac{g}{T} \frac{\gamma_{кр} - \gamma}{u_0^2}$; γ — стратификация натекающего потока, $\gamma_{кр}$ — средний

адиабатический градиент, $\beta = \gamma - \gamma_{кр}$. При решении (1) профиль препятствия аппроксимировался кривой $h(x) = \frac{ab^2}{b^2 + (x - x_0)^2}$, где a —

высота горы, b — полуширина, x_0 — координата центра горы. Следует подчеркнуть, что a не абсолютная высота горы, а ее относительная высота над уровнем плоскости озера. Решение для ψ' ищем с помощью разложения в интеграл Фурье аналогично [8]. Учитывая, что Фурье-образ $h(x)$ имеет вид abe^{-mb} и взяв интеграл с помощью теории вычетов, решение для ψ' в системе координат, в которой уровень поверхности земли соответствует $z = -h_0$ [8], получим в виде:

$$\psi' = u_0 l^{-\frac{1}{2}\alpha z} \operatorname{Re} \left[-ab \frac{b + i(x - x_0)}{b^2 + (x - x_0)^2} \frac{\sin lz}{\sin lh_0} + 2\pi i \theta(x - x_0) \sum_n R_n(m_n) \right], \quad (2)$$

$$R_n(m_n) = (-1)^{n+1} \frac{ab \sqrt{l^2 - m_n^2} l^{-m_n b}}{m_n h_0} \sin(\sqrt{l^2 - m_n^2} z) l^{-i m_n (x - x_0)}, \quad (3)$$

где $m_n = \sqrt{l^2 - \left(\frac{\pi n}{h_0}\right)^2}$; $l^2 = k^2 - \frac{\alpha^2}{4}$; $\alpha = \frac{g\alpha}{c_0^2} + \frac{\beta}{T}$; $x = \frac{c_p}{c_v}$, c_0 — скорость

звука. Из определения функции тока $u = e^{\alpha z} \frac{\partial \psi}{\partial z}$ и $w = -e^{\alpha z} \frac{\partial \psi}{\partial x}$ находились декартовы составляющие скорости ветра.

Микроструктура облаков и осадков рассчитывалась путем решения кинетических уравнений для функций распределения по размерам капель (f_1) и кристаллов (f_2) совместно с решением уравнений для температуры и влажности в криволинейной системе координат ($x' = x$, $z' = z - h(x)$, штрихи в дальнейшем опустим), аналогично [7, 9, 10]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right) + u \frac{dh}{dx} \gamma_a = \frac{\partial}{\partial z} k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right) + \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{L_1}{c_p} \varepsilon_{c1} + \frac{L_2}{c_p} \varepsilon_{c2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x} - \varepsilon_{c1} - \varepsilon_{c2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + u \frac{\partial f_i}{\partial x} + (w - v_i) \frac{\partial f_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r_i} (r_i f_i) = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial f_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial f_i}{\partial x} + \left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{col} + J_i, \quad (6)$$

где u , w компоненты скорости в криволинейной системе координат ($u = u_g$, $w = w_g - u_g \frac{dh}{dx}$); r_i — скорость роста капли и кристалла; v_i —

скорость падения частиц, $\left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{col}$ — скорость изменения спектров ка-

пель и кристаллов за счет гравитационной коагуляции и аккреции; ε_{ci} — скорости конденсации и сублимации; k_x , k_z — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии. Выражения в правой части (6), описывающие замерзание капель и зарождение кристаллов на естественных ядрах сублимации, а также зарождение кристаллов на искусственных льдообразующих ядрах задавались в виде [5, 7, 9, 10]:

$$J_1 = -a_F r_1^3 \exp |b_F (T_F - T)| f_1(r_1), \quad (7)$$

$$J_2 = a_S \exp |b_S (T_S - T)| \delta(r - r_a) \left(-\frac{dT}{dt} \right) \theta \left(-\frac{dT}{dt} \right) \theta(\Delta_2) - J_1 + \alpha(T) \cdot c \cdot \delta(r - r_a) \quad (8)$$

где $\theta(x)$ — функция Хэвисайда, $\delta(x)$ — дельта функция Дирака, $\alpha(T)$ — коэффициент, учитывающий температурную зависимость активации льдообразующих ядер, c — концентрация льдообразующих аэрозолей от линейных источников с удельной мощностью M_0 и удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial c}{\partial x} + M_0 - \alpha(T) c. \quad (9)$$

Зарождение ледяных кристаллов при активации искусственных льдообразующих ядер аппроксимировалось формулой, предложенной в работе [13] $n_{ak} = c \cdot \exp |B/(T - T_n)|$, где n_{ak} — число активных льдообразующих ядер при T ; T_n — пороговая температура активации. При этом коэффициент $\alpha(T)$ в уравнениях (8), (9) примет вид:

$$\alpha(T) = -\frac{B}{(T - T_n)^2} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \theta \left(-\frac{dT}{dt} \right), \quad (10)$$

где выражение $\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{dT}{dt}$ — лагранжевая скорость изменения температуры вдоль траектории переноса аэрозоля.

Уравнение (9) описывает распространение примеси от линейного источника. Для пересчета к точечному источнику, описывающему аэрозольный генератор, использовалось соотношение [1]:

$$\bar{c}(x, z, t) = \frac{c(x, z, t)}{2\sqrt{\pi k_0(x-x_i)}}, \quad (11)$$

где $k_0 = k_y/u$; k_y — коэффициент продольной турбулентной диффузии; x_i — горизонтальное расположение генераторов. При моделировании наземных источников профили ветра и турбулентность в приземном слое параметризовались степенными функциями аналогично [1].

Алгоритм решения. Начальные и граничные условия. Система уравнений (4) — (10) решалась методом расщепления в 4 этапа. На первом и втором этапах рассчитывались горизонтальный и вертикальный переносы субстанции, на третьем этапе учитывались процессы конденсации и сублимации. На заключительном этапе учитывались процессы коагуляции и аккреции в приближении непрерывного роста, а также процессы активации ядер конденсации и сублимации, замерзания капель, зарождение искусственных кристаллов на льдообразующих ядрах.

Начальные поля T , q , f_i , c задавались: $T(x, z)|_{t=0} = T_0 - \gamma_a h(x) - \gamma z$, $q(x, z)|_{t=0} = q_{s1}(T_0 - \gamma_a h(x)) [1 + (1 - q_{r0}) \exp(z/A_D)]$; $f_i(x, z, r_i)|_{t=0} = 0$. $c(x, z)|_{t=0} = 0$. Граничные условия для температуры и влажности при $z=0$: $T(x, 0) = T_0 - \gamma_a h(x)$; $q(x, 0) = q_{s1}(T_0 - \gamma_a h(x)) \cdot q_{r0}$, а для остальных граничных условий по x и z использовались условия свободной границы $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0\right)$.

По рассчитанным функциям распределения капель f_1 и кристаллов f_2 определялись следующие микрофизические характеристики облаков и осадков: водность q_{L1} ; ледность q_{L2} ; концентрация капель N_1 и кристаллов N_2 и их радиолокационная отражаемость Z :

$$q_{L1} = \frac{4}{3} \pi \rho_l \int_0^\infty r_i^3 f_i dr_i; \quad N_1 = \int_0^\infty f_i dr_i; \quad Z = \sum_{i=1}^2 64 \int_0^\infty r_i^6 f_i dr_i, \quad (12)$$

интенсивность осадков j и их сумма s ;

$$j = \frac{4}{3} \pi \rho_l \int_0^\infty r_i^3 v_i f_i dr_i; \quad S = \int_{t_0}^t j(t') dt', \quad (13)$$

где t_0 — начало выпадения осадков. Рассчитывались также пересыщения над водой (Δ_1) и над льдом (Δ_2).

Перед выводом на печать все необходимые поля пересчитывались на прямоугольную сетку с шагами Δx , Δz в декартовой системе, в которой и приведены ниже все результаты.

Результаты расчетов. При решении системы уравнений (1) — (10) следующие параметры выбирались постоянными: $a_F = 10^{-4} \text{ с м}^{-3} \text{ с}^{-1}$; $b_F = 0,2 \text{ град}^{-1}$; $a_S = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ г}^{-1} \text{ град}^{-1}$; $b_S = 0,26 \text{ град}^{-1}$; $a = 600 \text{ м}$; $b = 5 \text{ км}$; $h_0 = 1,8 \text{ км}$; $u_0 = 7 \text{ м/с}$; $\gamma = -6^\circ \text{ с/км}$; $\gamma_{кр} = 8^\circ \text{ с/км}$; $q_{r0} = 80 \%$; $T_0 = -5^\circ \text{С}$; $k_x = 50 \text{ м}^2/\text{с}$; $k_z = 5 \text{ м}^2/\text{с}$; $k_0 = 1 \text{ м}$; $N_{oc} = 5 \cdot 10^5 \text{ г}^{-1}$; $\beta = 0,6$; $l = 2 \text{ км}$; $A_D = 10 \text{ км}$; $T_F = T_S = 0^\circ \text{С}$; $T_n = -5^\circ \text{С}$; $B = 28 \text{ град}$; $r_a = 10 \text{ мкм}$; $\Delta t = 60 \text{ с}$. Остальные параметры варьировались и приведены в табл. 1. Область счета по горизонтали составляет 40 км, а по вертикали — 9 км. При решении системы уравнений (4) — (6) пространственный шаг по горизонтали принимался $\Delta x = 1 \text{ км}$, а по вертикали — $\Delta z = 300 \text{ м}$.

Уравнения (1), (9) решались с более частым разрешением — $\Delta x_c = 500$ м, $\Delta z_c = 60$ м. Центр горы расположен в точке $x_0 = 20$ км, $z_0 = 0$.

На рис. 1 представлены поля функции тока и вертикальных скоростей (рис. 1б). С подветренной стороны препятствия образуются внутренние гравитационные волны с чередованием областей нисходящих и восходящих движений. Максимальные восходящие движения $w \sim 1,5-2$ м/с наблюдаются в области $x \sim 23$ км, $z \sim 1,5-2$ км. За счет эффекта «обращения» гравитационных волн [5] возмущение воздушного потока наблюдается также с наветренной стороны, достигая высот 7—9 км ($w \sim \pm 5-10$ см/с.) Подобная картина волновой структуры обтекания препятствия находится в качественном согласии с наблюдениями [2, 4, 5, 8].

За счет сложной волновой структуры обтекания, в горных районах часто наблюдается многоярусная орографическая облачная система [5]. Такую картину иллюстрирует рис. 2а,б, где представлены поля водности, ледности (рис. 2а) и концентрации капель и кристаллов (рис. 2б) через 2,5 часа эволюции облаков. Облака Sc образуются с наветренной стороны препятствия и имеют чисто капельную структуру. Последнее обусловлено малой вероятностью замерзания ($J_1 \sim r_1^3$) капель, которые не успевают замерзнуть при горизонтальном переносе с $u_0 \sim 7$ м/с. Водность облаков q_{L1} достигает $q_{L1} \sim 0,4 \div 0,7$ г/кг. Облака среднего яруса смешанного фазового состояния Ac образуются на высотах $z \sim 3,5-5,5$ км. При этом температура в облаках Ac — $35^\circ\text{C} < T < -25^\circ\text{C}$, что повышает эффективность замерзания капель ($J_1 \sim \exp(b_F \Delta T)$). Концентрация кристаллов достигает $N_2 \sim 15-30$ г $^{-1}$. С подветренной стороны в областях восходящих движений образуются орографические облачные валы Ac и $\text{cu} \text{nd}$ с водностью $q_{L1} \sim 0,05$ г/кг. На высотах $z \sim 6,5-9$ км образуются чисто кристаллические перистые облака верхнего яруса с ледностью $q_{L2} \sim 0,04-0,07$ г/кг и концентрацией кристаллов $N_2 \sim 0,05-0,3 \cdot 10^4$ г $^{-1}$. Высокая концентрация кристаллов обусловлена двумя механизмами зарождения кристаллов: 1) при достижении насыщения надо льдом $\Delta_2 > 0$ зарождаются кристаллы за счет активации ядер сублимации; 2) далее при наличии восходящих движений $w \sim 10$ см/с на высотах $z \sim 7-9$ км, достигается также насыщение над водой $\Delta_1 > 0$ и зарождаются капли. А поскольку на этих уровнях $T < -40^\circ\text{C}$, то они спонтанно замерзают, давая большой вклад в N_2 . Средний размер кристаллов достигает 15—30 мкм. Такие концентрации и размеры кристаллов в перистых облаках обнаружены в самолетных измерениях [6].

Как отмечено в [4], такая сложная структура облаков часто наблюдается в бассейне оз. Севан в зимних условиях при обтекании

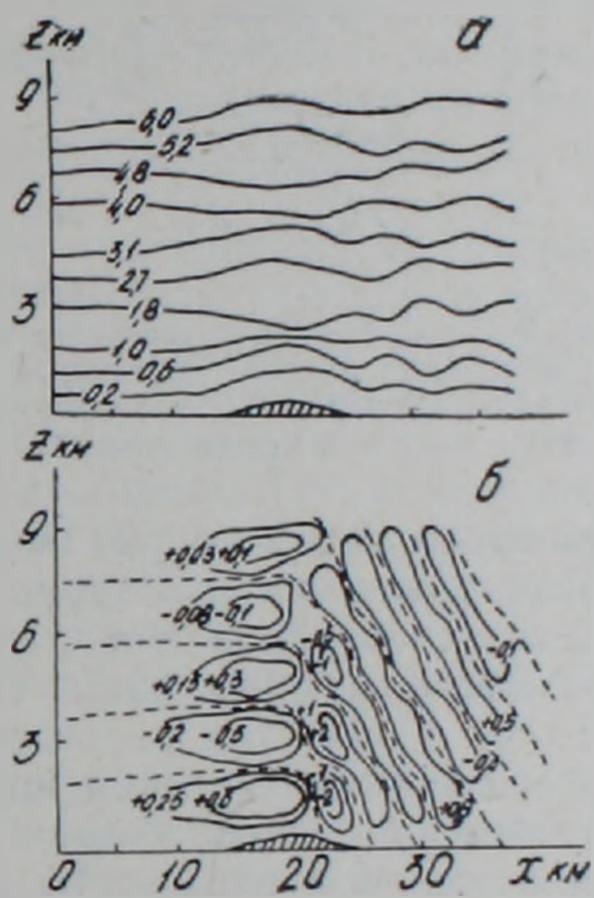


Рис. 1. Поля функции тока ψ , 10^8 см 2 /с (а); вертикальной скорости w , м/с (пунктир $w=0$). На этом и следующем рис. гора заштрихована.

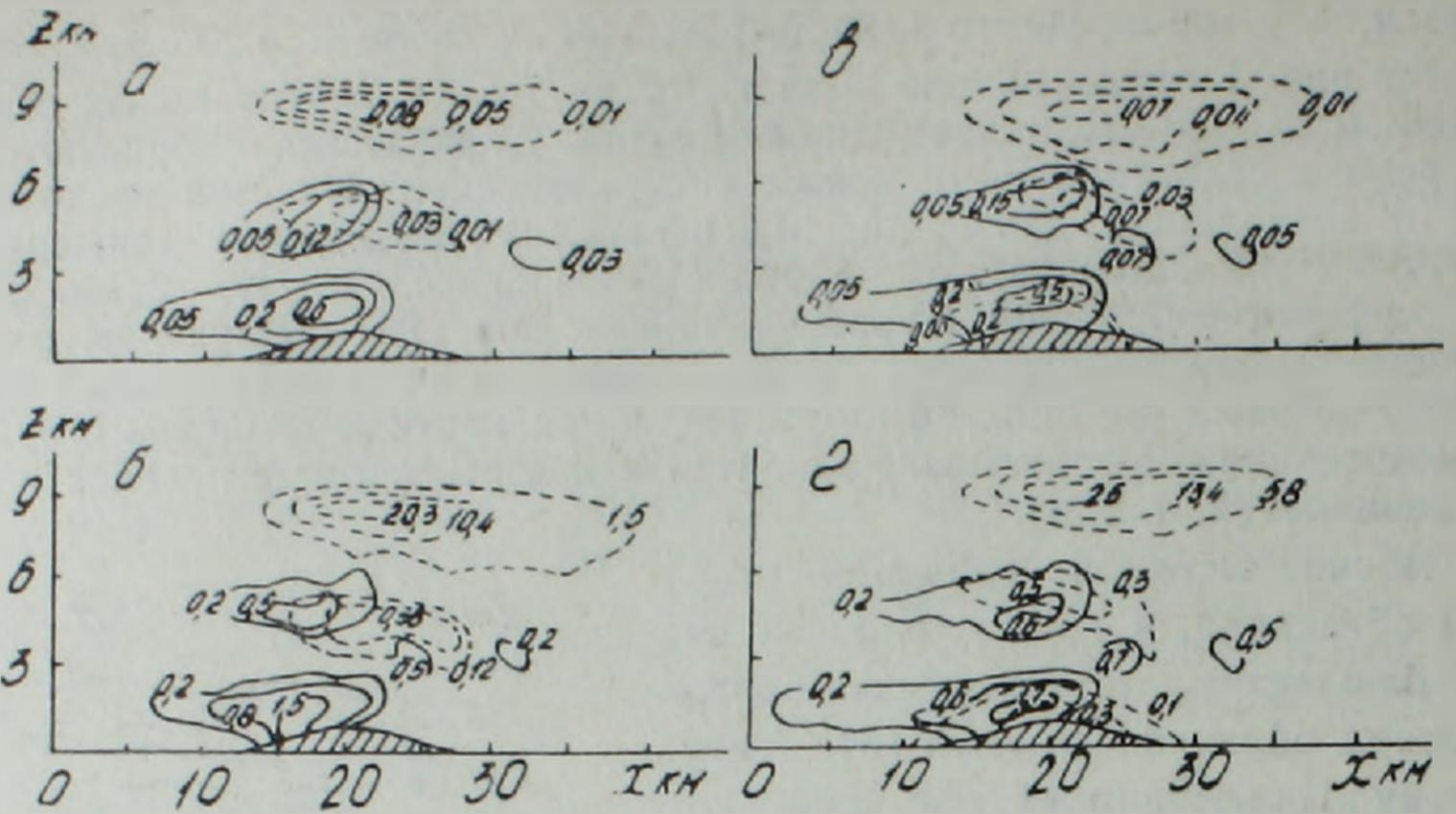


Рис. 2. Поля водности (сплошные линии) q_{L1} , г/кг; ледности (пунктир) q_{L2} , г/кг (а) концентрации капель (сплошные линии) N_1 , 10^5 г $^{-1}$ и кристаллов (пунктир) N_2 , 10^2 г $^{-1}$ (б) через 2,5 ч эволюции облачности, перед засевом, а также аналогичные поля через 1 и 15 мин после засева в варианте 1.

юго-западным потоком Гегамского хребта. Как видно на рис. 3 из [б], с наветренной стороны формируется протяженный облачный массив за счет охлаждения при орографическом подъеме, с подветренной стороны образуются стабильные орографические гряды облаков Sc—Ac в областях восходящих движений, разделенных безоблачными промежутками в нисходящих токах. Они почти всегда являются переохлажденно-капельными и пригодны для воздействия с целью увеличения осадков в бассейне оз. Севан. Рассчитанная мезоструктура облаков (рис. 2а,б) хорошо согласуется с наблюдаемой (рис. 3).

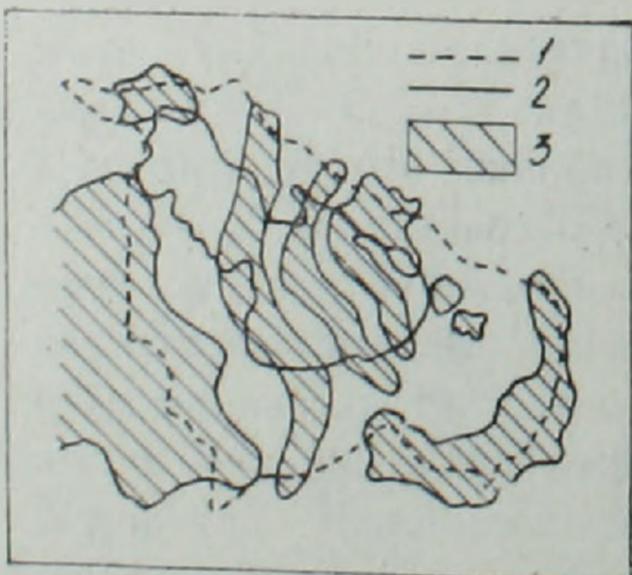


Рис. 3. Распределение поля облачности в бассейне оз. Севан по данным [4]: 1—граница водосборного бассейна оз. Севан; 2—береговая линия, 3—поле облачности.

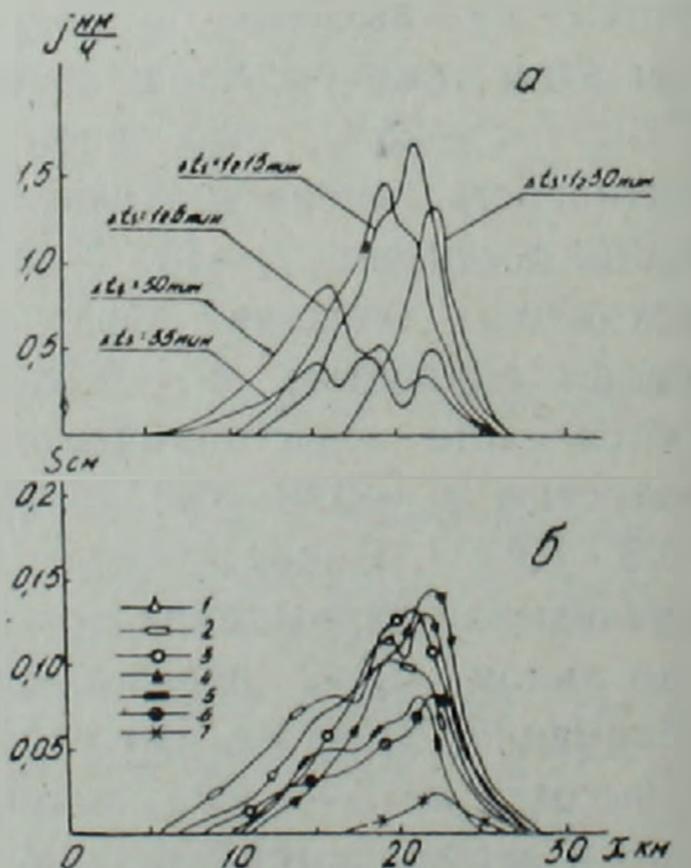


Рис. 4. Пространственно-временное распределение интенсивности осадков j , мм/ч (а) в варианте 1 и суммы осадков S , см (б) при различных расположениях наземных и приподнятых генераторов (номера линий соответствуют вариантам расчетов, приведенным в табл. 1).

Для оценки возможного увеличения осадков моделировался засев облаков при различных расположениях наземных и приподнятых аэрозольных генераторов. Пространственное расположение генераторов и их мощность (дозировка реагента) в различных вариантах засева приведены в табл. 1. В варианте 1 использовались приподнятые генераторы на высоте $z_j=60$ м, расположенные за 15 км до вершины хребта. При этом через 40 мин после начала засева облака Sc кристаллизуется, и генераторы в модели были выключены. На рис. 2в,г представлены поля водности и ледности (рис. 2в) и концентрации капель и кристаллов (рис. 2г) через 1 ч 15 мин после засева. Ледность облаков Sc достигает $q_{L2} \sim 0,1-0,3$ г/кг, а концентрация кристаллов $N_2 \sim 15-30$ г⁻¹. Интересно, что после выпадения части кристаллов и при переносе зоны искусственной кристаллизации в подветренную сторону, в областях восходящих движений происходит регенерация капельной фазы. Через 35 мин после выключения генераторов водность восстанавливается до 0,3—0,6 г/кг. Еще через 20—30 мин полностью восстанавливается жидкий водозапас облаков и появляется возможность повторного засева.

В горных районах приобретает большое значение вопрос о пространственно-временном распределении интенсивности осадков в естественных условиях и их перераспределении при активном воздействии по отношению к горному хребту. В частности, при решении проблем по сохранению уровня озера Севан необходимо максимальное увеличение осадков, выпадающих с подветренной стороны Гегамского хребта и поступающих в бассейн озера. При этом оптимальный выбор пространственного расположения наземных и приподнятых генераторов и их мощности зависит как от мезо- и микроструктуры облаков в естественных условиях, так и от скорости набегающего потока, формы препятствия и т. д.

Пространственно-временное распределение интенсивности осадков в варианте 1 и их сумма при различных расположениях и мощностях генераторов представлены на рис. 4(а,б). В варианте 1 генераторы были расположены за 15 км до вершины хребта на высоте $z_j=60$ м (например, на привязных баллонах). При этом выпадение искусственных осадков начинается через 20 мин после начала засева, а через 50 мин интенсивность осадков j достигает 0,9 мм/ч. Абсолютный максимум $j_{max}=1,7$ мм/ч наблюдается через 1 ч 15 мин после засева на удалении 2—3 км от вершины горы с подветренной стороны (рис. 4а). Выпадение осадков прекращается через 1 ч 45 мин. К этому времени сумма осадков, выпавших с наветренной стороны, достигает $S_1 \sim 0,07-0,12$ см, а с подветренной — $S_2 \sim 0,1-0,2$ см (рис. 4б). Интегральная

Таблица 1
Интегральные суммы осадков на 1 км вдоль хребта (тыс. г) с наветренной σ_1 и подветренной σ_2 сторон от вершины и общая сумма σ при различных расположениях и мощностях генераторов

Номер варианта	Расстояние от генератора до вершины хребта (x_0-x_i), км	Высота генератора над уровнем горы z_i , м	Дозировка реагента $c, 2^{-1}$	Общая сумма осадков σ	$\sigma_1(x < x_0)$ с наветренной стороны	$\sigma_2(x > x_0)$ с подветренной стороны	Отношение σ_2/σ , %
1	15	60	10^5	11	5	6	55
2	15	2	10^5	10	6	4	40
3	15	60	10^4	10,5	4,9	5,6	54
4	10	60	10^5	9	3	6	67
5	10	2	10^5	6,8	3,6	3,2	47
6	10	60	10^4	7,3	2,5	4,8	65
7	5	2	10^5	0,9	—	0,9	100
8	0	2	10^5	0,1	—	0,1	100

сумма осадков (на 1 км вдоль хребта) с наветренной стороны составляет — $\sigma_1 = 5$ тыс. т, с подветренной — $\sigma_2 = 6$ тыс. т, общая сумма — $\sigma = 11$ тыс. т (см. табл. 1). При этом сумма осадков, выпадающих с подветренной стороны в бассейн озера Севан, (σ_2) — составляет 55% от общей суммы осадков (σ). Дальнейший анализ проведем на основании данных табл. 1.

При засеве в варианте 2 с наземных генераторов слой осадков с наветренной стороны составляет $S_1 = 0,08 - 0,1$ см, а с подветренной стороны — $S_2 = 0,05 - 0,09$ см, суммы осадков $\sigma_1 = 6$ тыс. т, $\sigma_2 = 4$ тыс. т. При этом уменьшается отношение $\sigma_2/\sigma = 40\%$, т. е. основные осадки выпадают с наветренной стороны. При уменьшении дозировки реагента на порядок по сравнению с вариантом 1 общая сумма осадков σ уменьшается на 5%, но при этом почти сохраняется отношение $\sigma_2/\sigma = 54\%$. Таким образом, при приподнятых генераторах наблюдается увеличение осадков по сравнению с наземными генераторами, поскольку максимум водности находится на высотах 1—2 км, и при засеве обрабатывается больший облачный объем. Наиболее важно, что при подъеме генераторов происходит существенное перераспределение осадков. Если применить данные оценки к засеву при юго-западном переносе над Гегамским хребтом, то в варианте 1 при наземных генераторах 40% осадков выпадает в бассейне оз. Севан и 60% попадает в Разданский каскад (последняя колонка в табл. 1). При генераторах на уровне 60 м уже 55% снега выпадает в бассейне Севана. Перераспределение объясняется тем, что при высотном источнике зона кристаллизации смещается вверх, и кристаллы проходят больший путь по горизонтали до выпадения на землю. Интересно, что уменьшение дозировки реагента при одинаково расположенных генераторах приводит только к уменьшению общей суммы осадков с сохранением отношения σ_2/σ .

В вариантах 4, 5, 6 генераторы расположены на 5 км ближе, т. е. за 10 км до вершины. При приподнятом источнике ($z_j = 60$ м, вар. 4) сумма осадков с наветренной стороны составляет $\sigma_1 = 3$ тыс. т, с подветренной стороны — $\sigma_2 = 6$ тыс. т. При этом общая сумма осадков по сравнению с вариантом 1 уменьшается на 20%, искусственные льдообразующие ядра обрабатывают малый облачный объем с наветренной стороны, начинающийся выше по ветру (см. рис. 2а). При наземном источнике уменьшение общей суммы осадков составляет около 30%, с существенным перераспределением осадков по пространству ($\sigma_2/\sigma = 47\%$). Сравнение вариантов 4, 6 показывает, что уменьшение мощности генератора мало влияет на перераспределение ($\sigma_2/\sigma = 65\%$), в основном уменьшается общая сумма осадков (в варианте 6, $\sigma = 7,3$ тыс. т).

В вариантах 7 и 8 наземные генераторы расположены за 5 км и на вершине. Сумма осадков соответственно в 11 и 100 раз меньше, чем в вар. 1, 2, т. е. при чисто орографических облаках воздействие с вершины хребта или при небольших удалениях от нее не имеет смысла.

Отметим одно важное обстоятельство. Жидкий водозапас облаков до засева по расчетам составляет $Q_1 \sim 5,5$ тыс. т на 1 км вдоль хребта. В то же время сумма осадков при оптимальном засеве в 1,5—2 превосходит это значение (табл. 1). Причина в том, что после начальной кристаллизации облака в нем еще существует пересыщение над льдом $\Delta_2 \sim 10 - 15\%$, как это впервые отмечено в [1]. Интегральный по облаку запас способного к сублимации пара $Q_2 = \iiint_V \Delta_2 q_{s2} dV = 8 - 12$ тыс. т. Часть этого запаса и служит источником дополнительных осадков, так что интегральная сумма осадков на 50—100% может превосходить жидкий водозапас облака.

Заключение. Разработанная модель, учитывающая волновую структуру обтекания горного препятствия и микрофизические процессы в облаках, позволила смоделировать мезо- и микроструктуру орографической облачной системы, которая может быть использована при планировании работ по искусственному увеличению осадков в бассей-

не оз. Севан с целью сохранения уровня озера. Моделирование засева показало, что при чисто орографических облаках оптимальным является расположение аэрозольных генераторов за 15 км до вершины хребта с наветренной стороны (при скорости ветра $u_0 \sim 7$ м/с — на расстоянии получасового переноса от вершины). Генератор может работать в импульсном режиме: 30—40 мин работы и такой же интервал для регенерации жидкого водозапаса в облаке. При подъеме источника происходит увеличение осадков и их перераспределение: на 15—30% больше выпадает с подветренной стороны от гребня хребта. Воздействие с вершины или с удаления от нее ~ 5 км гораздо менее эффективно, т. к. сумма искусственных осадков составляет менее 10% от возможной. Сумма осадков составляет 5—10 тыс. т. на 1 км вдоль хребта, при частой повторяемости таких облаков и регулярных воздействиях в течение зимнего сезона это может привести к значительному увеличению снегозапаса.

Центральная аэрологическая обсерватория

Поступила 28.I.1937.

Գ. Ռ. ՔՈՐՈՅԱՆ, Վ. Ի. ԽՎՈՐՈՍՏՅԱՆՈՎ

ՕՐՈՎԳՐԱՖԻԿ ԱՄՊԵՐԻ ՎՐԱ ՆԵՐԳՈՐԾԱՆ ՄԻ ՆՄԱՆԱԿՈՂ ՄՈԴԵԼ՝ ՍԵՎԱՆԱ
ԼՃԻ ԱՎԱԶԱՆՈՒՄ ՏԵՂՈՒՄՆԵՐԻ ՔԱՆԱԿԸ ԱՎԵԼԱՑՆԵԼՈՒ ՆՊԱՏԱԿՈՎ

Ա մ փ ո փ ու մ

Օրոգրաֆիկ ամպերը լեռնային շրջաններում տեղումների քանակության ավելացման խնդրում ներգործման հիմնական օբյեկտներ են հանդիսանում, քանի որ լեռնաշղթաների շրջանահոսման ժամանակ օդային դանգվածի վերընթաց հոսանքների շնորհիվ զգալիորեն աճում է ամպերի ջրատարությունը: Ներկայումս Սևանա լճի մակարդակի պահպանման պրոբլեմի լուծման եղանակներից մեկն էլ հանդիսանում է ձմեռային օրոգրաֆիկ ամպերի վրա ներգործումը: Ըստ [4] աշխատության մեջ բերված ուսումնասիրությունների արդյունքների, ձմեռային պայմաններում հառավային և հարավ-արևմտյան օդային հոսանքների Գեղամա լեռնաշղթայի շրջահոսման ժամանակ կազմավորվում են կայուն օրոհիգրոգրաֆիկ ամպեր, որոնք կաթիլային բաղադրություն ունեն և ենթակա են ներգործման Սևանա լճի ավազանում տեղումների քանակության ավելացման համար: Նման պայմաններում ներգործման պարզագույն և ազդեցիկ միջոցներից մեկն է հանդիսանում աերոզոլային գեներատորների օգտագործումը: Սակայն դրանց օպտիմալ տեղաբաշխման համար անհրաժեշտ է մանրակրկիտ ուսումնասիրել ամպերի մեղու- և միկրոկաուուցվածքը, նրանց ջրատարությունը, աերոզոլների տարածման օրինաչափությունները, վերջիններիս փոխազդեցությունն ամպերի հետ և այլն: Այդ իսկ պատճառով բավականին ազդեցիկ միջոց է հանդիսանում մաթեմատիկական մոդելավորումը:

Սույն աշխատանքում երկչափ, ոչ ստացիոնար մոդելի կիրառման օգնությամբ ուսումնասիրված են լեռնաշղթայի շրջահոսման դինամիկայի բնութագրիչները, որի համար լուծվում է Հելմհոլցի ալիքային հավասարումը հոսքի ֆունկցիայի համար, ամպերի և տեղումների մեղու- և միկրոկաուուցվածքի համար լուծելով կինետիկ հավասարումներ կաթիլների և սառցաբյուրեղների՝ ըստ շափերի բաշխման ֆունկցիայի համար: Դիտարկված են նաև ջերմաստիճանի, խոնավության և աերոզոլների կոնցենտրացիայի համար

հավասարումները մրրկային հոսքի միջավայրում: Բնական սլայմաններում ամպերի մոդելավորումը ցույց է տալիս, որ սրուշ դեպքերում շրջահոսման ալիքային բնույթի շնորհիվ կաղմավորվում է բաղմահարկ օրոգրաֆիկ ամպերի բարդ սիստեմ: Ստորին և վերին հարկերի ամպերն ունեն, համապատասխանաբար, կաթիլային և բյուրեղային բաղադրություն, իսկ միջին հարկի ամպերը բաղկացած են թե կաթիլային և թե բյուրեղային մասնիկներից: Ներգործման մոդելավորումը ցույց է տալիս, որ գեներատորների օպտիմալ տեղաբաշխումը՝ կախված քամու հորիզոնական արագությունից և լեռնաշղթայի ռելիեֆից, հանդիսանում է այն հեռավորությունը, որը օդային զանգվածն անցնում է 30—40 րոպեում: Մասնավորապես, դիտարկված՝ քամու 7մ/վրկ արագության դեպքում, այդ հեռավորությունը կաղմում է 10—15 կմ: Հետաքրքիր փաստ է ստացվել, որ «մաքուր» օրոգրաֆիկ ամպերի դեպքում գեներատորները կարող են աշխատել իմպուլսային ռեժիմով՝ 30—40 րոպեի ընթացքում, իսկ դրանց անջատումից ևս 0,5—1 ժամ հետո տեղի է ունենում ամպերի ջրատարության լրիվ վերականգնում, որը հնարավորություն է ստեղծում կրկնակի ներգործման համար: Գեներատորների տեղաբաշխումը լեռնաշղթայի գագաթնամասում բերում է տեղումների քանակության նվազեցմանը 50—100 անգամ: Դիտարկված է տեղումների քանակության վերաբաշխումը լեռնաշղթայի նկատմամբ գեներատորների տարբեր տեղաբաշխման և հզորության դեպքում: Գնահատված է տեղումների քանակը Սևանա լճի ավազանում ամպերի վրա ներգործման ժամանակ:

G. R. TOROYAN, V. I. KHVOROSTYANOV

A SIMULATION MODEL OF OROGRAPHIC CLOUD SEEDING FOR PRECIPITATION ENHANCEMENT IN THE SEVAN LAKE BASIN

A b s t r a c t

Microphysical fields within orographic clouds and precipitation are analysed for the seed and non-seed cases using a two-dimensional, time-dependent mathematical model. The time-spatial distribution of precipitation intensity and amounts of snowfall are studied for different efficiencies and locations of nuclei generators.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Берлянд М. С. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975, 448 с.
2. Деннис А. Изменение погоды засевом облаков. М.: Мир, 1983, 272 с.
3. Лактионов А. Г. Об использовании наземных генераторов льдообразующих аэрозолей в работах по искусственному увеличению осадков в горных районах.—Метеорология и гидрология, 1982, № 3, с. 88—93.
4. Лесков Б. Н., Червоный Н. П. Поле облачности в бассейне оз. Севан зимой при юго-западном переносе.—Тр. УкрНИИ, 1976, вып. 144, с. 92—104.
5. Мазин И. П., Шметер С. М. Облака. Строение и физика образования. Л.: Гидрометиздат, 1983, 279 с.
6. Мазин И. П. Фазовое строение облаков и механизмы зарождения облачных кристаллов.—Метеорология и гидрология, 1986, № 8, с. 33—41.
7. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Хворостьянов В. И. Облака и климат. Л.: Гидрометиздат, 1986, 512 с.
8. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980, 549 с.

9. Тороян Г. Р. О влиянии размера препятствия, температуры и влажности на мезо- и микроструктуру орографических облаков.—Изв. АН АрмССР, Науки о Земле, 1986, № 4, с. 41—48.
10. Хворостьянов В. И., Тороян Г. Р. Микрофизическая численная модель зимних орографических облаков, осадков и воздействий на них.—Метеорология и гидрология, 1986, № 9, с. 18—26.
11. Эксперимент по увеличению осадков в бассейне оз. Севан. Под ред. Н. И. Вульфсона и Л. М. Левина. М.; Гидрометеиздат, 1986, 235 с.
12. Colorado River Pilot Project. Comprehensive evaluation report. Gleta, California, USA, October, 1976.
13. Plooster M. N., Fukuta N. A numerical model of precipitation from seeded and unseeded cold orographic clouds. J. Appl. Met., 1975, vol. 14, pp. 859—867.

Известия АН АрмССР, Науки о Земле, XI, № 4, 61—63, 1987

УДК: 551.248 (479.24) + 550.38

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Г. М. АВЧЯН, Т. А. ИСМАИЛ-ЗАДЕ, Г. Г. МАРКОСЯН, С. Н. НАЗАРЕТЯН

СООТНОШЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ОСЕЙ НЕКОТОРЫХ ПАЛЕОСТРУКТУР АЗЕРБАЙДЖАНА И ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЕРИОДА ИХ ЗАЛОЖЕНИЯ

Сопоставление палеомагнитных и палеотектонических данных по территории Армянской ССР позволило нам в 12 случаях из 14 наметить перпендикулярность осей вытянутых геологических структур и горизонтальных проекций направления магнитного поля эпохи образования этих структур [1] (рис. 1). Чтобы убедиться в законченности установленной связи в регионе, необходимо проведение аналогичных исследований в сопредельных районах.

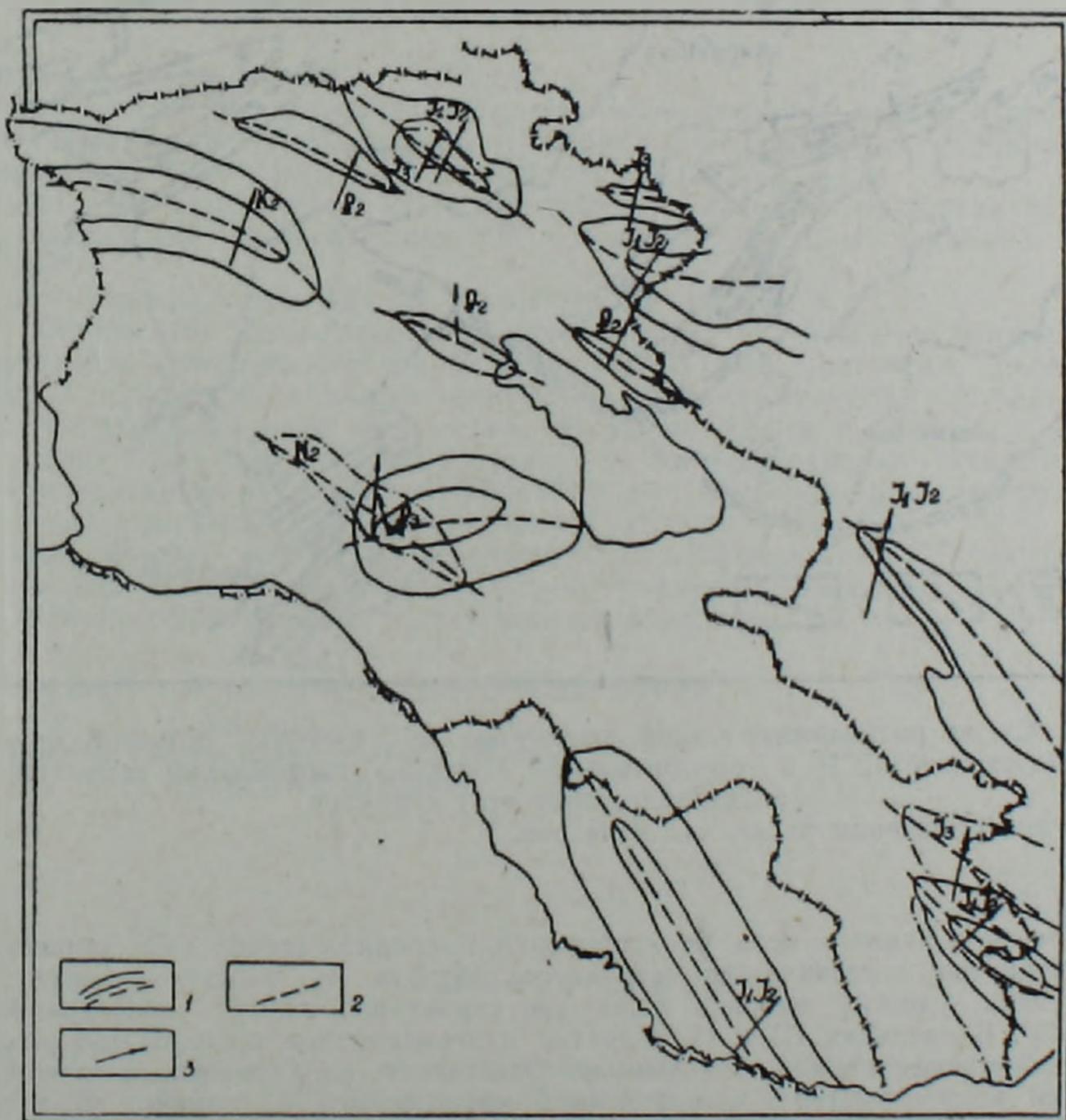


Рис. 1. Схема расположения осей вытянутых геологических структур на территории АрмССР и Нахичеванской АССР и горизонтальные проекции направлений геомагнитного поля эпохи заложения этих структур.

1—тектонические структуры, образованные в указанной геологической эпохе; 2—оси тектонических структур; 3—горизонтальная проекция направления геомагнитного поля указанного времени.