

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

2935 / 2-81

15/6-81

P6-81-173

Б.С.Джелепов, М.Я.Кузнецова, Т.И.Попова,
В.П.Приходцева, В.Г.Чумин

СХЕМА РАСПАДА ²⁰⁸At

Направлено на XXXI Совещание по ядерной
спектроскопии и структуре атомного ядра
/Самарканд, 1981/

1981

В настоящей работе продолжено исследование распада ^{208}At . В предыдущей работе ^{1/} нами показано, что ^{208}At имеет сложный спектр γ -лучей /около 190 линий/. Поэтому кажется очевидным, что схемы распада ^{208}At , предложенные ранее в работах ^{2,3/}, в одной из которых размещено 18 переходов ^{2/}, а в другой 33 перехода ^{3/}, нуждаются в серьезном уточнении. Одним из основных аргументов при построении схемы уровней дочернего нуклида являются сведения о $\gamma\gamma$ -совпадениях. Эти сведения в ^{2,3/} носят качественный характер.

В предлагаемой работе спектры $\gamma\gamma$ -совпадений изучены с помощью Ge(Li) -детекторов объемом 27 и 41 см³ / ΔE соответственно 3,5 и 3 кэВ для $E_{\gamma} \sim 1,3$ кэВ/. Временное разрешение системы составляло 50 нс. Коды событий /4096x4096/ передавались на ЭВМ HP-2116с и записывались на магнитную ленту. Обработка матрицы $\gamma\gamma$ -совпадений проводилась после эксперимента путем выбора "окон"^{4/}. Результаты количественного анализа спектров приведены в таблице, там же для сравнения даны интенсивности $\gamma\gamma$ -совпадений, рассчитанные по предложенной нами схеме распада $^{208}\text{At} \rightarrow ^{208}\text{Po}$ /см. рисунок/. Экспериментальные значения интенсивностей $\gamma\gamma$ -совпадений в основном получены из 3-4 определений, ошибки - среднеквадратические.

Предварительные результаты по исследованию спектров $\gamma\gamma$ -совпадений опубликованы в работе ^{5/}.

УРОВНИ ^{208}Po ПРИ РАСПАДЕ ^{208}At

В нуклиде $^{208}_{84}\text{Po}_{124}$ два протона находятся сверх замкнутой оболочки, и двух нейтронов не хватает до заполнения нейтронной оболочки. У нуклидов, близких к дважды магическому ядру $^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$, наблюдаются закономерности в последовательности нижних уровней, их квантовых характеристиках и временах жизни. У изотопов полония с четными массами $^{202}\text{Po} \div ^{210}\text{Po}$ в области энергий 0-1700 кэВ имеются подобные уровни с $I^{\pi} = 2^+, 4^+, 6^+$ и $8^{+/-8-}$, у изотопов ^{208}Po и ^{210}Po аналогия между отдельными возбужденными состояниями прослеживается вплоть до энергии 3 МэВ ^{7/}. У изотопов $^{202}\text{Po} \div ^{210}\text{Po}$ первый уровень с $I^{\pi} = 8^+$ является изомерным состоянием, период полураспада которого лежит в пределах 110-380 нс, причем только у ^{210}Po наблюдался переход с этого уровня; сведения об изомерных состояниях остальных изотопов полония получены на основании быстрых и запаздывающих $\gamma\gamma$ -совпадений.

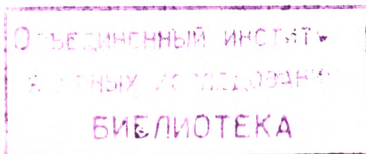


Таблица 1

Интенсивности $\gamma\gamma$ -совпадений при распаде ^{208}At

E_{γ_2} (кэВ)	$I_{\gamma_1, \gamma_2}(\Delta I_{\gamma_1, \gamma_2})$ эксперимент (отн. ед.)	$I_{\gamma_1, \gamma_2}(\Delta I_{\gamma_1, \gamma_2})^*$ по схеме распада (отн. ед.)	E_{γ_2} (кэВ)	$I_{\gamma_1, \gamma_2}(\Delta I_{\gamma_1, \gamma_2})$ эксперимент (отн. ед.)	$I_{\gamma_1, \gamma_2}(\Delta I_{\gamma_1, \gamma_2})^*$ по схеме распада (отн. ед.)
1	2	3	1	2	3
$E_{\gamma_1} = 177,595$ кэВ			$E_{\gamma_1} = 517,055$ кэВ		
205,400	35,0(26)	36,0(34)	294,04	~8	9,5(14)
294,04	~7	6,1(10)	660,040	58(7)	61(7)
333,674	8,0(30)	11,0(21)	686,517	68(8)	61(7)
517,055	39(4)	36(4)	2125,65	~6	7,8(12)
538,0	~3,5	2,2(3)	$E_{\gamma_1} = 660,040$ кэВ		
660,040	485(19)	490(32)	236,66	~6	5,5(6)
686,527	495(20)	490(32)	252,35	~11	7,8(13)
694,33	13(5)	20,4(34)	294,04	~11	10,4(18)
697,94	+	4,0(10)	333,674	16(4)	20(4)
769,34	~9	12,3(10)	669,45	~15	9,3(25)
811,18	+	7,2(10)	686,527	898(31)	898(49)
845,044	124(7)	117(8)	694,33	31(7)	34(6)
983,12	25,0(34)	27,0(20)	769,34	~14	21,0(16)
989,944	67(6)	61(7)	811,18	~16	12,2(16)
1195,31	8,0(14)	8,4(11)	845,044	210(14)	199(12)
1229,184	6,1(9)	6,0(9)	947,10	15(6)	17,3(12)
1360,12	5,0(10)	5,5(6)	983,12	58(14)	46,0(30)
1438,80	8,2(15)	6,6(7)	989,944	100(8)	104(12)
1797,42	5,0(15)	4,4(5)	1180,00	~14	10,8(11)
2029,33	8,2(16)	9,2(8)	1195,31	12(4)	14,3(19)
2125,65	4,3(16)	5,0(9)	1229,184	16(5)	10,0(14)
$E_{\gamma_1} = 205,400$ кэВ			1343,44	+	3,4(5)
660,040	53(6)	61(6)	1360,12	~7	9,3(9)
686,527	56(6)	61(6)	1438,80	8(4)	11,0(12)
845,044	62(5)	61(5)	1537,31	15(5)	17,4(22)
989,944	50(4)	45(4)	1797,42	~7	7,6(8)
			2029,33	16(5)	15,6(12)
			2125,65	13(6)	8,6(14)

Как указывалось выше, распад ^{208}At изучался в работах /2,3/. По сравнению с этими работами мы располагали значительно большими сведениями о γ -переходах ^{208}Po , возникающих при распаде ^{208}At , а также количественными результатами измерений спектров $\gamma\gamma$ -совпадений. Это позволило нам построить более полную и количественно обоснованную схему распада $^{208}\text{At} \rightarrow ^{208}\text{Po}$ /см. рисунок/.

Таблица 1 /продолжение/

1	2	3	1	2	3
$E_{\gamma_1} = 686,527$ кэВ			$E_{\gamma_1} = 694,33$ кэВ		
236,66	~5	5,5(6)	333,674	20(4)	18,6(20)
252,35	~12	7,8(13)	983,12	20(8)	31(5)
294,04	14(7)	10,4(18)	$E_{\gamma_1} = 807,137$ кэВ		
333,674	18(5)	20(4)	1229,184	23(5)	21,0(22)
669,45	~20	9,3(25)	$E_{\gamma_1} = 845,044$ кэВ		
694,33	40(6)	34(6)	989,944	100(10)	103(10)
769,34	~16	21,0(16)	1195,31	12,0(30)	14,1(15)
811,18	~12	12,2(16)	1438,80	~13	11,1(8)
845,044	188(11)	199(12)	1797,42	~10	7,5(7)
896,659	67(10)	54,1(33)	$E_{\gamma_1} = 1027,662$ кэВ		
947,10	~14	17,3(12)	1008,60	18(4)	20,2(24)
983,12	55(12)	46,0(30)			
989,944	102(6)	104(12)			
1180,00	~14	10,8(11)			
1195,31	18(6)	14,3(19)			
1229,184	19(7)	10,0(14)			
1343,44	28(6)	21,0(13)			
1360,12	15(5)	9,3(9)			
1537,31	17(4)	17,4(22)			
1797,42	10(4)	7,6(8)			
2029,33	22(7)	15,6(12)			
2125,65	+	8,6(14)			

* Интенсивности экспериментальных и рассчитанных по схеме распада $\gamma\gamma$ -совпадений нормированы по

$$I_{(\gamma_{686})(\gamma_{886})} = \frac{I_{\gamma_{660}} \cdot I_{\gamma_{886}}}{I_{\text{полн. 686}}} = 898 \quad \gamma\text{-ед. табл. 1 и 2 } /1/.$$

Ниже приведены аргументы в пользу предложенной схемы уровней ^{208}Po .

Уровни с энергиями 0; 686,527; 1346,567 и 1524,16 кэВ. Самыми интенсивными переходами при распаде ^{208}At являются E_2 -переходы с энергиями 177,595; 660,040 и 686,527 кэВ, их полные интенсивности соответственно равны 861, 927 и 1016 γ -ед. табл.1 /1/. Результаты опытов по $\gamma\gamma$ -совпадениям показывают, что рассматриваемые переходы находятся в каскаде. Наличие совпадений (γ_{686}) ($\gamma_{896, 1343}$) и отсутствие совпадений (γ_{177}) ($\gamma_{896, 1343}$)

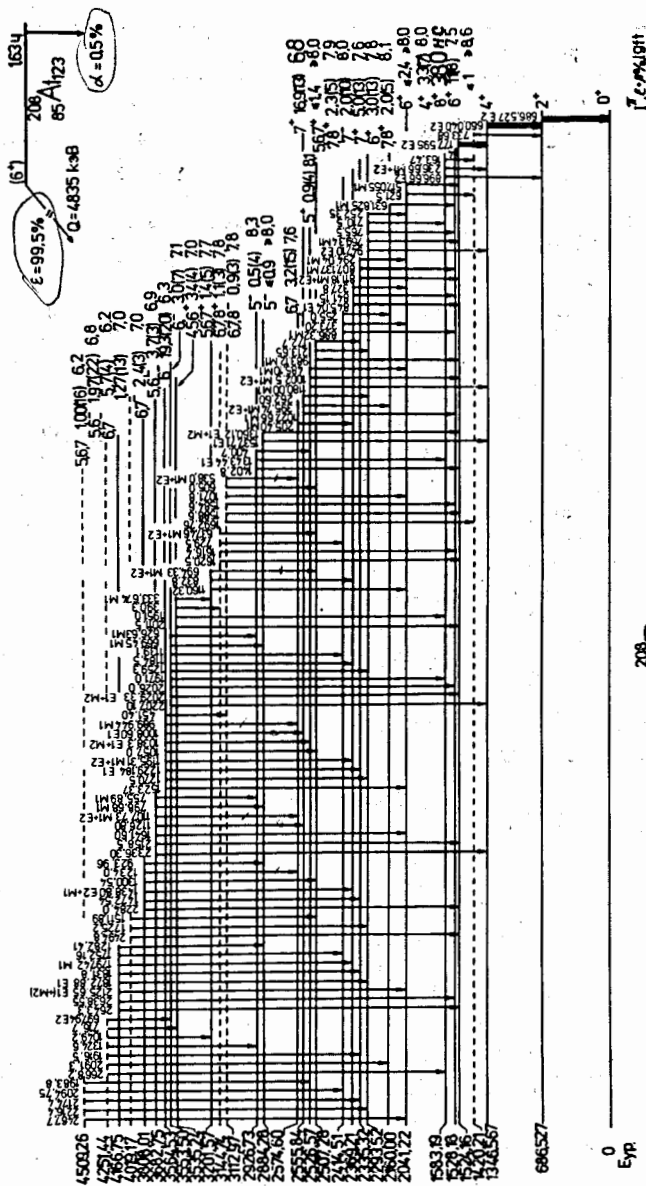


Схема распада ^{208}Po At \rightarrow ^{208}Po

^{208}Po
84

и ($\gamma 660$) ($\gamma 896$) указывают на то, что самым нижним в каскаде является наиболее интенсивный переход с энергией 686,527 кэВ. Вторым в каскаде является переход с энергией 660,040 кэВ, что следует из наличия совпадений ($\gamma 1537$) ($\gamma 660,686$) и отсутствия совпадений ($\gamma 1537$) ($\gamma 177$). Третьим в каскаде идет переход с энергией 177,595 кэВ. Такое размещение в каскаде наиболее интенсивных переходов приводит к следующей последовательности нижних уровней нуклида ^{208}Po : 0; 686,527; 1346,567 и 1524,16 кэВ. Эта последовательность уровней согласуется с результатами работ ^{2,7/}, в которых изучались функции возбуждения γ -лучей, сопровождающих реакции $^{209}\text{Bi}(p, 2n)^{208}\text{Po}$, $^{208}\text{Pb}(\alpha, 4n)^{208}\text{Po}$ и $^{206}\text{Pb}(\alpha, 2n)^{208}\text{Po}$. Спины рассматриваемых уровней соответственно 0, 2, 4, 6 однозначно получены в ^{2,7/} при исследовании угловых распределений γ -лучей, сопровождающих реакции ($\alpha, 4n$) и ($p, 2n$).

Уровень с энергией 1420,21 кэВ наблюдался в ^{2,7/} при изучении γ -лучей, сопровождающих реакции. Авторы этих работ ввели его также в схему распада ^{208}At . По нашему мнению, возбуждение этого состояния при распаде ^{208}At нуждается в подтверждении.

Уровень с энергией 1583,19 кэВ введен на основании совпадений ($\gamma 686$) ($\gamma 896$) и отсутствия совпадений ($\gamma 177,660$) ($\gamma 896$). Он подтверждается также совпадениями ($\gamma 236$) ($\gamma 660,686$).

Уровень с энергией 2041,22 кэВ введен на основании совпадений ($\gamma 517$) ($\gamma 177,660,686$).

Уровень с энергией 2293,52 кэВ введен на основании совпадений ($\gamma 660,686$) ($\gamma 947$) и отсутствия совпадений ($\gamma 177$) ($\gamma 947$). Этот уровень подтверждается также совпадениями ($\gamma 177,660,686$) ($\gamma 769$).

Уровень с энергией 2335,32 кэВ введен на основании совпадений ($\gamma 294$) ($\gamma 177,517,660,686$), он подтверждается совпадениями ($\gamma 811$) ($\gamma 177,660,686$).

Уровни с энергиями 2369,21; 2574,60 и 3564,53 кэВ. Переходы с энергиями 205,400; 845,044 и 989,944 кэВ находятся в каскаде, и все они дают совпадения с каскадом 686-660-177. При построении схемы уровней мы исходили из предположения, что нижним в каскаде 205-845-989 является наиболее интенсивный переход 845,044 кэВ / $I_{\text{полн.}} = 203 \gamma\text{-ед./}$, вторым - 205,400 кэВ / $I_{\text{полн.}} = 158 \gamma\text{-ед./}$ и последним - 989,944 кэВ / $I_{\text{полн.}} = 112 \gamma\text{-ед./}$. Таким образом были введены уровни с энергиями 2369,21 кэВ / $1524,16 + 845,044 = 2369,204$ /, 2574,60 кэВ / $2369,21 + 205,400 = 2574,61$ / и 3564,53 кэВ / $2574,60 + 989,944 = 3564,544$ /. Последний уровень подтверждается также совпадениями ($\gamma 1195$) ($\gamma 845,177,660,686$).

Уровень с энергией 2507,28 кэВ введен на основании совпадений (γ_{983}) ($\gamma_{177,660,686}$).

Уровень с энергией 2526,57 кэВ введен на основании совпадений (γ_{1180}) ($\gamma_{660,686}$) и отсутствия совпадений (γ_{177}) (γ_{1180}).

Уровень с энергией 2884,28 кэВ введен на основании совпадений (γ_{1360}) ($\gamma_{177,660,686}$), (γ_{1537}) ($\gamma_{660,686}$) и отсутствия совпадений (γ_{177}) (γ_{1537}).

Уровень с энергией 2926,73 кэВ введен на основании совпадений (γ_{686}) (γ_{1343}) и отсутствия совпадений (γ_{177}) (γ_{1343}).

Уровень с энергией 3201,57 кэВ введен на основании совпадений (γ_{694}) ($\gamma_{177,660,686,983}$).

Уровень с энергией 3535,24 кэВ введен на основании совпадений (γ_{333}) (γ_{694}), он подтверждается совпадениями (γ_{333}) ($\gamma_{177,686}$).

Уровень с энергией 3553,50 кэВ введен на основании совпадений (γ_{2029}) ($\gamma_{177,660,686}$).

Уровень с энергией 3808,01 кэВ введен на основании совпадений (γ_{1439}) ($\gamma_{845,177,660}$).

Уровень с энергией 4166,75 кэВ введен на основании совпадений (γ_{1797}) ($\gamma_{845,177,660,686}$) и (γ_{2126}) ($\gamma_{517,177,660,686}$).

Уровни с энергиями 1528,18 и 2555,84 кэВ. Мы наблюдали совпадения (γ_{807}) (γ_{1229}) и (γ_{1027}) (γ_{1008}). Переход с энергией 1229,184 кэВ размещен между уровнями 3564,53 и 2335,32 кэВ, существование которых уже обосновано. Так как интенсивность перехода 807,137 кэВ $I_{\text{полн.}} = 62 \text{ у-ед.}$ больше интенсивности перехода 1229,184 кэВ $I_{\text{полн.}} = 32 \text{ у-ед.}$, то нижним в каскаде 807-1229 принимаем переход 807,137 кэВ. Он должен идти с уровня 2335,32 кэВ и, следовательно, заселять уровень с энергией 1528,18 кэВ /2335,32 - 807,137 = 1528,183/. Суммы энергий в каскадах 1027-1008 и 807-1229 равны между собой: 1027,662 + 1008,60 = 2036,262 и 807,137 + 1229,184 = 2036,321. Отсюда вытекает, что каскад 1027-1008 следует разместить между теми же уровнями, что и каскад 807-1229. Интенсивность перехода 1027,662 кэВ $I_{\text{полн.}} = 175 \text{ у-ед.}$ значительно больше интенсивности перехода 1008,60 кэВ $I_{\text{полн.}} = 23 \text{ у-ед.}$, так что первым в каскаде будет переход 1027,662 кэВ, он заселяет уровень 1528,18 кэВ, и таким образом мы вводим новый уровень с энергией 2555,84 кэВ /1528,18 + 1027,662 = 2555,84/, на который разряжается переход 1008,60 кэВ. Мы не наблюдали совпадений (γ_{807}) ($\gamma_{177,660,686}$) и (γ_{1027}) ($\gamma_{177,660,686}$), это говорит о том, что возбужденное состояние ^{208}Po с энергией 1528,18 кэВ является изомерным, а именно тем состоянием, верхний предел энергии которого 1533 кэВ

/8+/ дан в работе ^{12/}. Энергия рассматриваемого уровня в работе ^{13/} получена равной 1528,0 кэВ. Время жизни этого состояния 380 нс ^{12/}.

Уровни с энергиями 2160,00 и 2414,51 кэВ. Несмотря на то, что переходы 631,825 и 886,32 кэВ являются довольно интенсивными $I_{\gamma_{631}} = 33 \text{ у-ед.}$, $I_{\gamma_{886}} = 25 \text{ у-ед.}$, мы не наблюдали совпадений (γ_{631}) ($\gamma_{177,660,686}$) и (γ_{886}) ($\gamma_{177,660,686}$). Это означает, что рассматриваемые переходы идут либо на основное состояние ^{208}Po , либо на изомерное состояние 1528,18 кэВ/380 нс/. Мы приняли второй вариант, так как в этом случае уровни с энергиями 2160,00 кэВ /1528,18 + 631,825 = 2160,005/ и 2414,51 кэВ /1528,18 + 886,32 = 2414,50/ подтверждаются и другими связями в схеме уровней ^{208}Po /см. рисунок/.

Уровни с энергиями 3112,97; 3144,74; 3682,75; 4019,17; 4251,44 и 4509,26 кэВ введены только на основе баланса энергий и интенсивностей.

В работах ^{12,7/} изучались спектры γ -лучей, ЭВК и $\gamma\gamma$ -совпадений как при распаде ^{208}At , так и в реакциях ($p, 2n$), ($\alpha, 4n$) ^{12,7/} и ($\alpha, 2n$) ^{12/}. Рахконен ^{13,7/}, предложив более полную схему распада ^{208}At , чем в ^{12/}, к сожалению, не опубликовал экспериментальных результатов исследования излучений ^{208}At , на основе которых строилась схема, не привел обоснованных доводов в пользу своего варианта схемы.

Сравнение схем распада ^{208}At , предложенных нами и в ^{13,7/}, показывает, что в основном они хорошо согласуются между собой. Существование следующих возбужденных состояний ^{208}Po : 686,5/2⁺, 1346,5/4⁺, 1420,0/3⁺, 1524,0/6⁺, 1528,0/8⁺, 1583,0/4⁺, 2041,0/6⁺, 2159,9/8⁺, 2293,4/5,6⁺, 2335,1/7⁺, 2369,0/6,7⁻, 2414,3/8⁺, 2506,9/5,6⁺, 2555,6/7,8⁺, 2574,3/6,7⁻, 2884,3/5,6/, 2926,3, 3553,3/5,6/, 3564,3/6,7⁻ и 3807,5 кэВ, предложенных в ^{13,7/}, подтверждено в нашей работе. В нашей схеме нет уровней 3219,3; 3321,3 и 3609,6 кэВ. С двух первых уровней в ^{13,7/} направлено лишь по одному переходу соответственно с энергиями 1872,8 и 1797,3 кэВ, но эти переходы в схеме настоящей работы /см. рисунок/ размещены иным способом. Уровень 3609,6 кэВ ^{13,7/} закреплен лишь одним слабо интенсивным переходом 2085,6 кэВ, и мы считаем введение его в схему недостаточно обоснованным.

Из десяти новых уровней, введенных нами в схему распада $^{208}\text{At} \rightarrow ^{208}\text{Po}$, четыре уровня /2526,57; 3201,57; 3535,24 и 4166,75 кэВ/ подтверждаются результатами изучения спектров $\gamma\gamma$ -совпадений.

Квантовые характеристики четно-четного ядра $^{208}\text{Po} - I^{\pi} = 0^+$. Спин основного состояния ^{208}At , согласно правилам Нордгейма, должен быть равен 6, а четность по модели оболочек - положи-

тельная. Квантовые характеристики возбужденных состояний ^{208}Po , начиная с уровня 1583,19 кэВ, определены на основании известных мультипольностей γ -переходов, представленных нами в работе ^{1/}. При вычислении значений $\lg ft$ разность масс ^{208}At - ^{208}Po принята равной 4835 кэВ ^{19/}.

В схеме распада $^{208}\text{At} \rightarrow ^{208}\text{Po}$ /см. рисунок/ между 30-ю уровнями размещено 111 γ -переходов. Несмотря на то, что в схеме не размещено около 80 переходов с суммарной интенсивностью $19 \pm 3\%$ на распад, мы наблюдали хорошее согласие экспериментальных и рассчитанных по схеме интенсивностей γ -совпадений. Это позволяет надеяться, что введение в схему неразмещенных переходов не приведет к существенным изменениям предлагаемой нами схемы распада $^{208}\text{At} \rightarrow ^{208}\text{Po}$.

В заключение мы благодарим М.Гонусека, И.И.Громову, А.Караджаева, Ю.В.Норсева за помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахтель В.М. и др. Тезисы докладов XXXI Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. "Наука", Л., 1981, с.156,158.
2. Treytl W.J., Hyde E.K., Yamazaki T. Nucl.Phys., 1968, A117, p.481.
3. Rahkonen V., Hattula J. Dept.of Phys., Univ. of Jyväskylä Ann. Rep., 1978; Jyväskylä, 1979, p.3-16.
4. Андерт К. и др. ОИЯИ, Р6-8564, Дубна, 1975.
5. Вахтель В.М. и др. Тезисы докладов XXXI Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. "Наука", Л., 1981, с.160.
6. Yamazaki T. Phys.Rev., 1970, C1, p.290.
7. Rahkonen V. Dept. of Phys., Univ. of Jyväskylä Res.Rep., No.10/1980.
8. Nagamiya S., Inamura T. Nucl.Phys., 1972, A182, p.84.
9. Wapstra A.H., Bos K. At. Data and Nucl. Data Tables, 1977, 19, No.3.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 марта 1981 года.