

УДК 556.33.4.04

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОСТИ КОЛЕБАНИЙ  
АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ  
(НА ПРИМЕРЕ БЕЛАРУСИ)**

|                   |            |
|-------------------|------------|
| Канд. техн. наук  | В.Е. Валу- |
|                   | ев         |
| Канд. геогр. наук | А.А. Вол-  |
|                   | чек        |
|                   | О.П. Ме-   |
|                   | шик        |

*В современных условиях использования водных ресурсов за частую роль гидрометеорологических факторов игнорируется, в том числе и атмосферные осадки. В данной статье сделана попытка учета как синхронности, так и асинхронности атмосферных осадков, для составления реальных схем комплексного использования и охраны водных ресурсов Республики Беларусь на основе математического моделирования.*

Распределение атмосферных осадков по территории Беларуси представляет собой сложную картину «пятнистости», обусловленную определенным сочетанием физико-географических факторов исследуемого региона. Глобальные и местные факторы находятся в достаточно сложном взаимодействии и влияют на атмосферные осадки всей своей совокупностью. Выполненный нами поиск оптимальной длины ряда наблюдений методом последовательного анализа дал 70-летние и более периоды с устойчивой средней величиной атмосферных осадков на территории Беларуси. Однако имея длительные ряды наблюдений, различные авторы до настоящего времени получают не одинаковые годовые нормы атмосферных осадков для одних и тех же метеопунктов. Отклонения величин осадков существенны и составляют от 15 до 30 % «истинной» годовой нормы (130...200 мм). Такое количество атмосферных осадков для территории Беларуси соизмеримо с оросительной нормой многолетних трав в среднезасушливый год (75 % - ной обеспеченности дефицитов водопотребления). Пространственная изменчивость атмосферных осадков нами оценивается по следующей схеме

$$C_{vi} = \left( \sum_j (M_{ij} / \bar{M}_i - 1)^2 \cdot (K - 1) \right)^{0,5}, \quad (j = \overline{1, K}), \quad (1)$$

где  $M_{ij} = f(X_j; Y_j; H_j; t_i)$  – значения атмосферных осадков в любом (j)-пункте Беларуси в функции от его географических координат ( $X_j; Y_j$ ), высоты местности над уровнем моря ( $H_j$ ) и времени ( $t_j$ );  $\bar{M}_i$  – среднее значение атмосферных осадков (норма) для (i) - го интервала времени. Полученные величины ( $C_{vi}$ ) для территории Беларуси представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты пространственной вариации ( $C_{vi}$ ) атмосферных осадков для территории Беларуси (в целом)

|          | Месяц |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | од  |
|----------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 0   | 1   |     |
| $C_{vi}$ | ,11   | ,10 | ,09 | ,08 | ,06 | ,05 | ,07 | ,07 | ,08 | ,07 | ,10 | ,10 | ,05 |

Оценка пространственно-временных колебаний величин атмосферных осадков на территории Беларуси осуществлена при комплексном исследовании экспериментальных материалов 124 метеопунктов и за репрезентативный пятнадцатилетний период с 1951 по 1965 гг. Этому периоду соответствует максимальное число пунктов наблюдений, ряды являются однородными.

В результате перераспределения тепла и влаги по земной поверхности, образуются районы, имеющие какой-либо общий признак. Одним из таких признаков является синхронность колебаний метеорологических элементов. В качестве основного способа оценки синхронности колебаний величин атмосферных осадков на территории Беларуси мы отдали предпочтение вычислению парной корреляции рядов наблюдений за осадками, исходя из того, что коэффициент корреляции является не только объективной качественной, но и количественной характеристикой этих колебаний. При этом выделяются группировки рядов, скоррелированные не менее заданного уровня (например,  $r_{kp} = 0,8$ ). Опыт районирования территории Беларуси по осадкам с использованием данного приема отсутствует, поэтому ограничимся изложением результатов собственных исследований синхронности их месячных величин в годовом разрезе. Наиболее приемлемый уровень скоррелированности атмосферных осадков ( $r_{kp}$ ) представлен помесечно в табл. 2.

Таблица 2

Исходный уровень скоррелированности атмосферных осадков,  
принятый для территории Беларуси

|           | Месяц |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | од  |
|-----------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|           |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 0   | 1   |     |
| <i>кД</i> | ,85   | ,75 | ,88 | ,78 | ,78 | ,75 | ,76 | ,76 | ,82 | ,85 | ,84 | ,85 | ,80 |

В районах синхронного выпадения атмосферных осадков установлена их пространственно-временная изменчивость ( $C_v$ ). Каждому месяцу присущ только свой набор пунктов, объединенных в характерном районе. Количество районов синхронного выпадения осадков для каждого месяца представлено в табл. 3.

Таблица 3

Количество районов синхронного колебания атмосферных осадков  
на территории Беларуси

| Ра<br>Июн | Месяц |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | од |
|-----------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|           |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 0 | 1 |    |
|           | 1     | 1 | 9 | 7 | 9 | 4 | 2 | 6 | 0 | 5 | 1 | 9 | 7  |

Необходимо отметить, что границы выделенных нами районов (рис. 1) часто совпадают с границами почвенных районов, водосборов и приурочены к естественным повышениям рельефа. «Пятнистость» выпадения атмосферных осадков, выявленная в репрезентативный период (1951...1965 гг.), можно априори распространить на сколь угодно длительную ретроспективу, чтобы данный фактор, наряду с другими, использовать как определяющий при исследовании генезиса почв и пестроты почвенного покрова в целом на территории Беларуси.

Обнаруживается достаточно тесная связь очертаний границ районов синхронного выпадения дождей в июне (рис. 1) и почвенного покрова юго-западной части территории Беларуси [3]. На данной территории распространены полугидроморфные почвы (подзолисто-болотные, дерново-болотные, дерново-карбонатно-солончаковые, аллювиальные дерново-болотные). Среднемноголетняя норма осадков (июнь), активно участвующих в почвообразовательном процессе, колеблется по территории от 55 до 71 мм. Атмосферные осадки являются определяющим фактором общего круговорота воды, растворения, переноса химических элементов на боль-

шие расстояния и распределения их по исследуемой территории в соответствии с выявленной картиной «пятнистости». Кроме того, обнаруживается аналогичное (зональное) распределение по территории Беларуси комплекса радиактивных частиц, выпавших после Чернобыльской катастрофы. Для мая количество районов синхронного выпадения атмосферных осадков достаточно велико (табл. 3), особенно на юго-востоке Могилевской, Гомельской и Брестской областей, а также на северо-востоке Гродненской и юго-западе Минской области. Именно здесь имеет место наибольшая пестрота плотности радиактивного загрязнения.

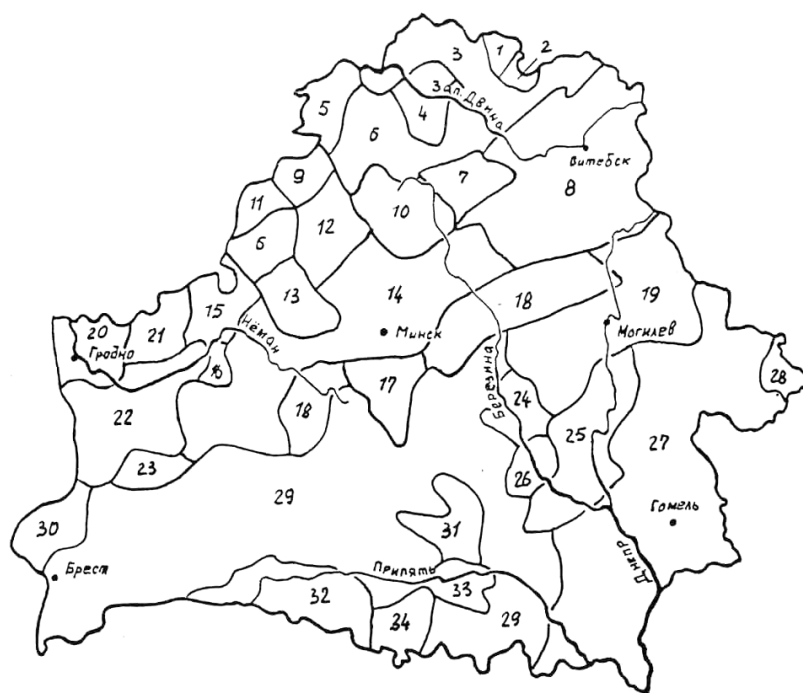


Рис. 1. Схема районирования территории Беларуси по синхронности выпадения атмосферных осадков в июне (районы 1...34) при  $r_{кр} = 0,75$ .

Плотность и репрезентативность осадкомерной сети такова, что не обеспечивает данными наблюдений все исследуемые (локальные) участки, в частности сельскохозяйственные поля, в границах которых необходимо иметь количественные показатели влагообмена на уровне подстилающей земной поверхности. Поэтому, в основу прикладной количественной оценки атмосферных осадков, нами положена возможность определения их величин в любой конкретной точке сельскохозяйственного поля. Это

может быть реализовано с помощью трехмерной нелинейной модели, аппроксимируемой полиномом второй степени, когда в качестве исходной функции пространственного распределения осадков принимается функция  $(X(\varphi, \lambda, H))$  [2], а само уравнение имеет вид

$$X_j = \alpha_{0j} + \alpha_{1j} \cdot \varphi + \alpha_{2j} \cdot \lambda + \alpha_{3j} \cdot H + \alpha_{4j} \cdot \varphi^2 + \alpha_{5j} \cdot \lambda^2 + \alpha_{6j} \cdot H^2 + \alpha_{7j} \cdot \varphi\lambda + \alpha_{8j} \cdot \varphi H + \alpha_{9j} \cdot \lambda H, \quad (2)$$

где  $X_j$  – норма атмосферных осадков в расчетном пункте за  $(j)$  – интервал времени, мм;  $\varphi, \lambda$  – условные прямоугольные координаты (широта, долгота) расчетного пункта, принятые, в данном исследовании, относительно пункта Минск, км;  $H$  – абсолютная отметка поверхности земли в расчетном пункте, м;  $\alpha_{0j}, \dots, \alpha_{9j}$  – коэффициенты частных уравнений регрессии (2) для оценки сумм атмосферных осадков за различные интервалы осреднения (табл. 4).

Значения коэффициентов  $(\alpha_{ij})$ , полученные по уравнению (2), подтверждают наибольший вклад в величины атмосферных осадков основного регионального фактора – высоты местности ( $H$ ).

При решении ряда прикладных задач используются среднесуточные величины осадков  $(\bar{P}_{сум})$ . Оценка их значений, заданных на дискретном множестве точек, и экстраполяция на всю область определения функции непрерывного аргумента возможны с использованием Фурье-анализа. Аппроксимирующая функция разлагается в ряд Фурье и находится сумма этого ряда по формуле

$$f(X) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nX + b_n \cdot \sin nX), \quad (3)$$

где  $a_0, a_n, b_n$  – коэффициенты Фурье, которые находятся по формулам (табл. 5):

$$a_0 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{k=1}^m Y_k; \quad (4)$$

$$a_n \approx \frac{2}{m} \cdot \sum_{k=1}^m Y_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot k}{m}\right) \cdot n; \quad (5)$$

$$b_n \approx \frac{2}{m} \cdot \sum_{k=1}^m Y_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot k}{m}\right) \cdot n, \quad (6)$$

где  $m$  — число известных пар значений  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_m, Y_m)$ .

Таблица 5

Коэффициенты Фурье, рекомендуемые к использованию при оценке среднесуточных осадков на территории Беларуси (формулы 4, 5, 6)

| Значения соответствующих коэффициентов в формулах (4), (5), (6) |        |       |        |        |       |
|---|--------|-------|--------|--------|-------|
| $a_0$   | $a_1$  | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$  | $a_5$ |
| -   | -      | 0,    | -      | 0,     | 0,    |
| 1,9758  | 0,4732 | 0986  | 0,0023 | 0734   | 0123  |
| $b_1$   | $b_2$  | $b_3$ | $b_4$  | $b_5$  |       |
| 0,1   | -      | 0,1   | 0,0    | -      |       |
| 589   | 0,3145 | 057   | 222    | 0,0544 |       |

Таблица 4

Коэффициенты частных уравнений регрессии вида (2) для оценки сумм атмосферных осадков на территории Беларуси

| Расчетный период ( $j$ ), значения коэффициентов ( $\alpha_{ij}$ ), коэффициент множественной корреляции ( $R$ ) |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |      |
|--|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------|
| $j$  | $\alpha_0$   | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ | $\alpha_6$ | $\alpha_7$ | $\alpha_8$ | $\alpha_9$ | *    |
| Январь   | 0            | 0          | 0,0170     | 0          | -0,0001    | -0,00003   | 0,0003     | 0          | 0          | 0          | 0,75 |
| Февраль  | 41,9416      | 0          | 0          | 0          | 0,0000     | 0          | 0,0003     | 0          | 0          | 0          | 0,53 |
| Март   | 42,6742      | 0          | 0,0398     | 0          | -0,0001    | -0,00003   | 0,0002     | 0,0001     | 0          | -0,0002    | 0,71 |
| Апрель   | 49,8383      | -0,0093    | 0,0676     | 0          | -0,0001    | -0,00004   | 0          | 0          | 0          | -0,0004    | 0,61 |
| Май  | 50,3442      | 0          | 0,0334     | 0,0747     | -0,0001    | -0,00006   | 0          | 0          | -0,0001    | -0,0002    | 0,54 |
| Июнь   | 66,7504      | -0,0036    | 0          | 0,0788     | -0,0001    | 0,00002    | 0          | 0          | 0          | 0          | 0,55 |
| Июль   | 78,6171      | -0,0137    | 0,0370     | 0,0720     | -0,0001    | -0,00015   | 0          | 0,0002     | 0          | 0          | 0,57 |
| Август   | 66,4695      | 0,0229     | -0,0454    | 0,1063     | 0,0001     | -0,00007   | 0          | -0,0001    | 0          | 0,0002     | 0,68 |
| Сентябрь   | 63,2795      | 0          | 0,1173     | 0          | -0,0001    | -0,00009   | 0          | 0,0001     | 0,0002     | -0,0007    | 0,80 |
| Октябрь  | 50,6118      | 0,0118     | 0,0630     | 0,0233     | 0,0000     | -0,00006   | 0          | 0,0001     | 0          | -0,0003    | 0,73 |
| Ноябрь   | 65,1734      | 0,0085     | -0,0242    | -0,1479    | 0,0000     | -0,00009   | 0,0007     | -0,0001    | 0          | 0,0002     | 0,73 |
| Декабрь  | 71,5567      | 0          | 0,0656     | -0,1685    | -0,0002    | -0,00005   | 0,0006     | 0,0001     | -0,0001    | -0,0003    | 0,68 |
| Год  | 638<br>,7432 | 0          | 0,4764     | 0,7357     | 0,0009     | 0,00067    | 0          | 0,0005     | 0          | 0,0021     | ,79  |

Примечание: \* – критическое значение коэффициента множественной корреляции ( $R_{кр.} = 0,31$  [1]).





График предлагаемой функции аппроксимации среднесуточного количества атмосферных осадков на территории Беларуси представлен на рис. 2, где точками обозначены среднемесячные значения осадков в привязке к суточному их ходу.

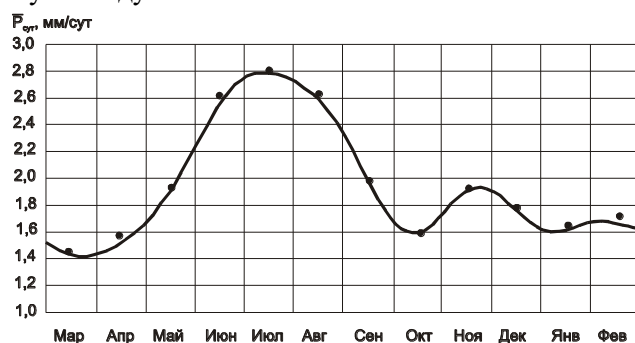


Рис. 2. Среднесуточное количество осадков  $\bar{P}_{сут.}$ , мм/сут на территории Беларуси.

Моделирование суточных значений атмосферных осадков нами проводится методом статистических испытаний (Монте-Карло). Рассмотрим конкретный пример. Пусть имеются суточные значения атмосферных осадков для марта месяца, рассчитанные по формуле (3), которые приведены в табл. 6.

Таблица 6

Суточные значения атмосферных осадков (март) на территории Беларуси, полученные по формуле (3)

| Календарные даты / атмосферные осадки, мм/сут. |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| 1  | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 1      | 1      |  |
| /1,68  | /1,67  | /1,66  | /1,65  | /1,65  | /1,64  | /1,64  | /1,63  | /1,62  | 0/1,61 | 1/1,60 |  |
| 1  | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 2      | 2      | 2      |  |
| 2/1,59   | 3/1,59 | 4/1,58 | 5/1,57 | 6/1,56 | 7/1,55 | 8/1,55 | 9/1,54 | 0/1,53 | 1/1,52 | 2/1,52 |  |
| 2  | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      | 3      | 3      |        |        |  |
| 3/1,51   | 4/1,50 | 5/1,50 | 6/1,49 | 7/1,49 | 8/1,48 | 9/1,48 | 0/1,47 | 1/1,47 |        |        |  |

Методом статистических испытаний нами установлено также распределение на территории Беларуси периодов с осадками и без осадков (для марта приведены в табл. 7).

Суммарное количество атмосферных осадков, выпавших в  $(j)$  – период с дождливой погодой, при имитационном моделировании определяется как

$$P_{j-пер} = \sum_{i=1}^{m_j} P'_{сум} , \quad (7)$$

где  $m_j$  – количество суток в ( $j$ ) периоде с осадками;  
 $P'_{сум} = P_{сум} + \bar{\zeta}_{j(сум)}$  – исправленное на среднесуточную величину  
 $(\bar{\zeta}_{j(сум)})$  суточное количество атмосферных осадков ( $P_{сум}$ ), рассчитанных по формуле (3), – табл. 6, 7.

Таблица 7

Распределение на территории Беларуси периодов с осадками  
(заштриховано) и без осадков в течение марта

| Календарные даты |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|                  |   |   |   |   |   |   |   |   | 0 | 1 |
| 2                | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 1 | 2 |
| 3                | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 1 |   |   |

Суммарная величина поправки за рассматриваемый ( $j$ ) период ( $\zeta_j$ ) определяется за время, эквивалентное по продолжительности периоду ( $j-1$ ) с ясной погодой, смежному и предшествующему рассматриваемому периоду ( $j$ ). При этом, используется зависимость (3) и равенство

$$\zeta_j = \sum_{i=1}^{m_{j-1}} P''_{сум(j-1)} . \quad (8)$$

Среднесуточная величина поправки ( $\bar{\zeta}_{j(сум)}$ ), вносимой в суточные величины атмосферных осадков дождливого периода ( $j$ ), определяется как

$$\bar{\zeta}_{j(сум)} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m_{j-1}} P''_{сум(j-1)} , \quad (9)$$

где  $\sum_{i=1}^{m_{j-1}} P''_{сум(j-1)}$  – сумма суточных величин атмосферных осадков, рассчитанных по функции (3), табл. 6, 7, за время ( $m_{j-1}$ ), эквивалентное по продолжительности периоду ( $j-1$ ) с ясной погодой;  $m_j$  – продолжитель-

ность рассматриваемого ( $j$ ) периода, в который вносится поправка;  $m_{j-1}$  – то же предшествующего периода с ясной погодой ( $j-1$ ).

Дискретно смоделированное во времени суточное количество атмосферных осадков для марта месяца представлено в табл. 8.

Таблица 8

Суточные значения атмосферных осадков на территории Беларуси (март), полученные имитационным моделированием (формулы 7...9)

| Календарные даты / атмосферные осадки, мм/сут |        |        |        |        |       |       |       |     |        |        |    |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-----|--------|--------|----|
| 1   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6     | 7     | 8     | 9   | 10     | 11     | 12 |
| /1,68   | /-     | /-     | /-     | /2,07  | /2,06 | /2,06 | /2,05 | /-  | 0/1,84 | 1/1,83 |    |
| 1   | 1      | 1      | 1      | 1      | 1     | 1     | 1     | 2   | 2      | 2      | 2  |
| 2/1,82  | 3/1,82 | 4/1,81 | 5/1,80 | 6/1,79 | 7/-   | 8/-   | 9/-   | 0/- | 1/-    | 2/-    |    |
| 2   | 2      | 2      | 2      | 2      | 2     | 2     | 3     | 3   |        |        |    |
| 3/2,28  | 4/2,27 | 5/-    | 6/-    | 7/-    | 8/-   | 9/-   | 0/-   | 1/- |        |        |    |

Предлагаемая нами статистическая модель реализации процесса выпадения атмосферных осадков на территории Беларуси может экстраполироваться на любой по продолжительности период. Моделирование процесса выпадения атмосферных осадков различной обеспеченности позволяет получить любое количество его реализаций и, следовательно, любое количество реализаций процесса управления водным балансом (режимом) на исследуемом уровне. Управление водным балансом процесса теплообмена на уровне деятельной поверхности водосборов исключает потерю информации, позволяет привлекать смоделированные ряды балансовых элементов оптимальной продолжительности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валуев В.Е., Волчек А.А., Пойта П.С., Шведовский П.В. Статистические методы в природопользовании. – Брест: Брестский политехнический институт, 1999. – 252 с.
2. Валуев В.Е., Волчек А.А., Юрченко Н.Т. К вопросу интерполяции, осреднения и инженерных расчетов воднобалансовых характеристик. – Красноярск.: СибНИИГиМ, 1990. – С. 17-32.
3. Почвы Белорусской ССР. – Мн., 1974.

Институт проблем Полесья НАН РБ  
Брестский Государственный технический университет

АТМОСФЕРАЛЫС ЖАУЫН-ШАШЫННЫҰ АУЫТСУУЫНЫҰ  
СИНХРОНДЫЛЫҰЫН ЗЕРТТЕУ Ж...НЕ ОЛАРДЫ МАТЕМАТИКАЛЫС  
МОДЕЛЬДЕУ (МЫСАЛ РЕТІНДЕ БЕЛОРУССИЯ АЛЫНҒАН)

Техн. Җылымд. канд.  
Геог. Җылымд. канд.

В.Е. Валуев  
А.А. Волчек  
О.П. Мешик

*Sazirgi* уаҗытта су ресурстарын јолданЈанда гидрометеорологиялыј факторлар, оныЎ ішінде атмосфералыј жауын-шашындар еленбейді. Бгл мајалада комплексті јолданудыЎ најты Глгісін жасау ж.,не математикалыј модельдеуге сГйене отырып, Белорусия республикасыныЎ су ресурстарын јорЈау Гшін атмосфералыј жауын-шашынныЎ синхрондылыЈын ж.,не асинхрондылыЈын есепке алуЈа „рекет жасалынады.